44º SENAFOR

Hotel Plaza São Rafael
Porto Alegre-RS, 1, 2 e 3 de outubro de 2025

EXPEDIENTE
EQUIPES ORGANIZADORAS
PROMOÇÃO
CONTATOS
APOIO
SESSÃO DE ABERTURA

FORJAMENTO

28ª Conferência Internacional de Forjamento

CHAPAS / Brddrg

14ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas
11º Congresso do BrDDRG

RENOMAT

14ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis

INOVMAT

3ª Conferência Internacional de Inovação em Materiais e Manufatura

Anais
PROCEEDINGS

44º SENAFOR
Hotel Plaza São Rafael
Porto Alegre-RS, 1, 2 e 3 de outubro de 2025

Anais PROCEEDINGS

FORJAMENTO
28ª Conferência Internacional de Forjamento

CHAPAS / Brddrg
14ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas
11º Congresso do BrDDRG

RENOMAT
14ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis

INOVMAT
3ª Conferência Internacional de Inovação em Materiais e Manufatura

44º SENAFOR
Anais do Seminário Nacional de Forjamento
ISSN 2764-4316

EXPEDIENTE

O SENAFOR é um encontro que acontece anualmente e reúne profissionais, educadores e pesquisadores, especialmente das áreas metal-mecânico e agregadas, e nesta 44ª edição agregou a 28ª Conferência Internacional de Forjamento – Brasil; /14ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas / 11º Congresso do BrDDRG; 14ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis e 3ª Conferência Internacional de Inovação em Materiais e Manufatura.

O 44º SENAFOR foi realizado em Porto Alegre, RS, nos dias 1, 2 e 3 de outubro de 2025.

Os textos aqui incluídos são da exclusiva responsabilidade de seus autores e publicados conforme o original enviado. Todos os direitos e autorização de uso das informações contidas nestes anais pertencem aos editores.

The texts of these proceedings were printed according to the original sent by the authors. All rights on the contents belong to the editors.

44º SENAFOR

Hotel Plaza São Rafael
Porto Alegre-RS, 1, 2 e 3 de outubro de 2025

Anais PROCEEDINGS

FORJAMENTO
28ª Conferência Internacional de Forjamento

CHAPAS / Brddrg
14ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas
11º Congresso do BrDDRG

RENOMAT
14ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis

INOVMAT
3ª Conferência Internacional de Inovação em Materiais e Manufatura

COMISSÃO ORGANIZADORA

Coordenação geral
Prof. Dr. Eng. Lirio Schaeffer (UFRGS / CBCM)

Comitê Organizacional:
André Rosiak (UFRGS Porto Alegre, RS)
Diego Wermuth (UFRGS Porto Alegre, RS)
Luana de Lucca de Costa (UFRGS Porto Alegre, RS)
Matheus Henrique Riffel (UFRGS Porto Alegre, RS)
Rafael Gustavo Schreiber (UFRGS Porto Alegre, RS)
Rafael Pandolfo da Rocha (UFRGS Porto Alegre, RS)

COMISSÃO ORGANIZADORA POR ÁREA

FORJAMENTO
Coordenação:
Alberto Moreira Guerreiro Brito (LdTM / UFRGS)
Comitê Técnico-Científico:
Alisson Duarte da Silva (UFMG)
Carlos Augusto Silva de Oliveira (UFSC)
Mathias Liewald (Institute of Metal Forming Technology (IFU) Alemanha)
Paulo António Firme Martins (IST/Universidade de Lisboa, Portugal)
Paulo Roberto Cetlin (UFMG)

CONFORMAÇÃO DE CHAPAS / BRDDRG:
Coordenação CICC:
Alexandre da Silva Rocha (LdTM - UFRGS)
Halston José Mozetic (UFRGS Porto Alegre, RS)
Coordenação BrDDRG:
Luis Fernando Folle (UFSM, Santa Maria RS)
Comissão técnico/cientifica:
Abel Dias dos Santos (Universidade do Porto, Portugal)
Paulo Victor Prestes Marcondes (UFPR, Curitiba PR)

RENOMAT
Coordenação:
Carlos Alexandre dos Santos (PUCRS)
Comitê Técnico-Científico:
Alex Fabiano Bueno (UFSC Campus Blumenau, SC)
Aline Cristiane Pan (UFRGS)
André Possamai Rosso (UFSC)
Cesar Rolando N. Nunura (UTEC / Lima - PERU)
Noé Cheung (UNICAMP / Campinas - BRASIL)
Roderval Marcelino (UFSC)
Vicente Mariano Canalli (ECPCVC)
Vilson Gruber (UFSC)

INOVMAT
Coordenação:
Patrice Monteiro de Aquim (Universidade FEEVALE)
Comitê Técnico-Científico:
Anderson Daleffe (UNISATC, Urussanga SC)
Adriane Prisco Petry (UFRGS DEMEC)
Claudia Trindade (FEEVALE)
Cristiane Krause Santin (UNISINOS)
Eduardo Cassel (PUCRS)
Everton Hansen (UNISINOS)
Sandra Raquel Kunst (UFRGS, Porto Alegre RS)
Vinicius Martins (IFSUL)

44º SENAFOR

Hotel Plaza São Rafael
Porto Alegre-RS, 1, 2 e 3 de outubro de 2025

Anais PROCEEDINGS

FORJAMENTO

28ª Conferência Internacional de Forjamento

CHAPAS / Brddrg

14ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas
11º Congresso do BrDDRG

RENOMAT

14ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis

INOVMAT

3ª Conferência Internacional de Inovação em Materiais e Manufatura

PROMOÇÃO E REALIZAÇÃO

- Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS
- Centro Brasileiro de Inovação em Conformação Mecânica – CBCM
- BrDDRG Grupo Brasileiro de Pesquisas em Conformação de Chapas (Brazilian Deep Drawing Research Group)
- Fundação Luiz Englert

44º SENAFOR
Hotel Plaza São Rafael
Porto Alegre-RS, 1, 2 e 3 de outubro de 2025

Anais PROCEEDINGS

FORJAMENTO

28ª Conferência Internacional de Forjamento

CHAPAS / Brddrg

14ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas
11º Congresso do BrDDRG

RENOMAT

14ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis

INOVMAT

3ª Conferência Internacional de Inovação em Materiais e Manufatura

CONTATO / CONTACT

Centro Brasileiro de Inovação em Conformação Mecânica / CBCM
Metalforming Innovation Center / CBCM
Universidade Federal do Federal do Rio Grande do Sul UFRGS
Universidade Federal do Rio Grande do Sul UFRGS
Av. Bento Gonçalves 9500
Caixa postal 15021
Centro de Tecnologia - Campus da Agronomia
91501-970 Porto Alegre - RS

Fundação Luiz Englert - FLE
Rua Matias José Bins, 364
Bairro Três Figueiras
CEP: 91.330-290
Porto Alegre / RS / Brasil
Fone: +55 +51 3286.4333 / 3286.4343 / 99679.4662
E-mail: fle@fle.org.br

Secretaria
SECRETARIAT Secretaria para Eventos
Lourdes Grings
E-mail: senafor.br@gmail.com
Telefone/WhatsApp: +55 (51) 99981-2841

44º SENAFOR

Hotel Plaza São Rafael
Porto Alegre-RS, 1, 2 e 3 de outubro de 2025

Anais PROCEEDINGS

FORJAMENTO

28ª Conferência Internacional de Forjamento

CHAPAS / Brddrg

14ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas
11º Congresso do BrDDRG

RENOMAT

14ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis

INOVMAT

3ª Conferência Internacional de Inovação em Materiais e Manufatura

Apoio Institucional

Patrocínio Master

Patrocínio Ouro

Patrocínio Prata

Midia apoiadora

44º SENAFOR
Hotel Plaza São Rafael
Porto Alegre-RS, 1, 2 e 3 de outubro de 2025

Anais PROCEEDINGS

FORJAMENTO
28ª Conferência Internacional de Forjamento

CHAPAS / Brddrg
14ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas
11º Congresso do BrDDRG

RENOMAT
14ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis

INOVMAT
3ª Conferência Internacional de Inovação em Materiais e Manufatura

SESSÃO DE ABERTURA DO 42º SENAFOR
OPENING SESSION

Opening / BOAS-VINDAS
Lirio Schaeffer (LdTM/CBCM/UFRGS)
Homenagem Especial: *HASSMANN S.A.*

Keynote Lecture: Hassmann 70 anos - trajetória e desafios futuros
Carlos Hassmann (Hassmann S/A, Imigrante, RS)

Keynote Lecture: Central de Negócios como fator de Competitividade da Indústria Associada
Mauricio Rossa (Sindicato das Indústrias, Metalúrgicas, Mecânicas e do Material Elétrico de Blumenau)

Keynote Lecture: Políticas de Inovação voltadas ao Setor Industrial no Rio Grande do Sul
Simone Stülp (Secretária de Inovação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul)

FORJAMENTO
28ª Conferência Internacional de Forjamento

PALESTRAS E TRABALHOS TÉCNICOS
LECTURES & TECHNICAL PAPERS

1 - AI-Augmented Digital Twins for Intelligent Forging
Junhe Lian (IBF - Universidade Técnica de Aachen, Alemanha)

2 - ICME approaches in Metal Forming
Sebastian Münstermann (IBF - Universidade Técnica de Aachen, Alemanha)

3 - Inovações em Moldes e Matrizes: resultados do Programa MOVER – Linha IV
Ana Paola Villalva Braga (IPT, São Paulo SP)

4 - VisionLab, medição ótica instantânea 3D, ganhos de produtividade com melhora do do OEE
Visionlab, instant 3D optical gauging, productivity gains with improved OEE
J. B. Graef (SouthWind International – São Paulo SP), Greg Nygaard (General Inspection – Davisburg – MI U.S.A.)

5 - Palestra institucional INDUCTOTHERM
Inductotherm Group – Inductoforge na Indústria 4.0
Fernando Teodoro (Inductotherm – Indaiatuba SP)

6 - La Nuova Pressa Idraulica FICEP
Gabriele Colombo (Ficep SpA - Varese, Lombardia, Itália)

7 - A Simulação Física do Forjamento a Quente-Técnicas, Benefícios e Casos Reais
The Physical Simulation of Hot Forging – Techniques, Benefits and Real-Life Cases
Fulvio Siciliano (Dynamic Systems In./GLEEBLE São Paulo, SP)

8 - Parâmetros de Simulação relativos ao Método dos Elementos Finitos aplicado ao Forjamento
Simulation Parameters related to the Finite Elements Method aplied to Forging
Alisson Duarte, Ricardo Viana (SIXPRO Virtual&Practical Process)

9 - Experiência de análise e projeto de uma linha de forjamento com base na especificação térmica e de produtividade usando o programa ELTA / 2DELTA.
Experience of analysis and design of a forging line based on thermal and productivity specification using ELTA / 2DELTA program.
José Carlos Zerbini (Synergetica Sistemas e Processos – São Paulo SP); Alexandr N. Ivanov e Vladimir A. Bukanin (Saint-Petersburg Electrotechnical University (LETI), Russia); Eduardo Baptistelli (São Paulo SP)

10 - Palestra Institucional ArcelorMittal
Parceria e Evolução: Como a ArcelorMittal está ampliando sua presença em aços para forjaria
André Luiz Assunção (ArcelorMittal Brasil)

11 - Otimização do Processo de Fabricação do Estojo com Auxílio do QForm API
Forging Optimization of a Cartridge Case using QForm API
Rafael Coutinho Pinto (EMGEPRON)

12 - Caracterização da integridade superficial de uma matriz para forjamento a quente fabricada via high speed milling
Surface integrity analysis of a hot forging tool manufactured through high-speed milling
Felipe Canal, João Vitor Piovesan Dalla Nora, Vinicius Waechter Dias, Fernando Michelon Marques, Alexandre da Silva Rocha (UFRGS / IFSC)

13 – Sistemas Ciberfísicos aplicados em fornos de aquecimento por indução para forja
Cyber Physical Systems applied to induction forge heaters
Alexandr Ivanov, Vladimir Bukanin, Alexei Zenkov (SPb. Electrotechnical University - LETI - St. Petersburg University, Russia), José Carlos Zerbini (Synergetica – São Paulo SP)

14 - Mecanismos de Controle do Tamanho de Grão Austenítico em Aços Microligados Forjados a Quente.
Austenitic Grain Size Control Mechanisms in Hot -Formed Microalloyed Steels.
Jorge Luis Braz Medeiros (FURG)

15 - Motion Capturing for Handicraft Production Steps - Possibilities for Future Automation Approaches
Kristian Arntz (Fachhochschule Aachen / Alemanha)

16 - Estudo de Viabilidade da Conformação Híbrida de Engrenagens Metal–Polímero
Feasibility Study on Hybrid Forming of Metal–Polymer Gears
ALBA Diego R., EBERT Calvin, REITINGER Philip, BONTEN Christian, LIEWALD Mathias (Institut für Umformtechnik, Universität Stuttgart, Holzgartenstrasse 17, 70174 / Institut für Kunststofftechnik, Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 32, 70569 - Stuttgart, Germany)

17 - Palestra Institucional Metalúrgica SCHWARZ
Excelência em soluções de alumínio forjado
Leandro Santos (Executivo Comercial, Schwarz S/A – Colombo PR)

18 - Forjados e Matrizes: Cases Aplicados à Indústria Local com Simulação no QForm UK
Forged Parts and Dies: Cases in the Local Industry using QForm UK
Ricardo Viana, Alisson Duarte (SIXPRO Virtual&Practical Process)

19 - Efeito da Temperatura da Matriz e da Velocidade no Recalcamento a Quente do AA2024: Um Estudo Numérico Computacional
Effect of Die Temperature and Speed on Hot Upsetting of AA2024: A Computational Numerical Study
Buglioni Luciano, Pezzolo Matías, Sanchez Matías, Abate Germán, Martinez Krahmer Daniel (Instituto Nacional de Tecnología Industrial / Universidad Nacional de Lomas de Zamora, Facultad de Ingeniería, ARGENTINA)

20 - O Benefício da Utilização de Aço Premium no Processo de Forjamento
The Benefit of Using Premium Steel in the Forging Process
Matheus Espindola de Souza (Metalli Aços Especiais – Caxias do Sul RS)

21 - Integração tecnológica e protagonismo humano no forjamento: perspectivas práticas da Indústria 5.0
Technological integration and human protagonism in forging: practical perspectives of Industry 5.0
Fernando Silveira de Aguiar e Lirio Schaeffer (SENAI São Leopoldo / UFRGS)

22 - Aplicação de Inteligência Artificial na Previsão de Dureza de Peças Forjadas a Quente
Application of Artificial Intelligence in the Prediction of Hardness of Hot-Forged Parts
Peterson Duarte Diehl, André Rosiak, Roderval Marcelino, Lirio Schaeffer (CBCM / UFRGS)

23 - Análise de parâmetros no Processo de Extrusão a Frio do Aço SAE 1004 para Obtenção de Parafusos de Cabeça Sextavada Frangeada
Analysis of Parameters in the Cold Extrusion Process of SAE 1004 Steel to Obtain Flanged Hexagonal Head Bolts
Édipo de Almeida de Freitas, André Rosiak; Diego Pacheco Wermuth, Thomas Gomes dos Santos, Lirio Schaeffer (CBCM / UFRGS)

24 - Investigação do Forjamento a Morno do Aço Microligado ao Vanádio DIN 30MnVS6
André Rosiak, Vicente Martin Biason, Helena Bonow Silveira, Marina Barletta Sommer, Lirio Schaeffer (CBCM UFRGS)

25 - Utilização de Inteligência Artificial para Prever o Coeficiente de Atrito no Ensaio do Anel
André Rosiak, Mateus M. S. Camillo, Diego Pacheco Wermuth, Lirio Schaeffer (CBCM UFRGS)

SENAFOR 2025 - Forjamento

VisionLab, medição ótica instantânea 3D, ganhos de produtividade com melhora do OEE.

Autores: **Mr. Greg Nygaard – General Inspection USA**
Eng. João Batista Graef – SouthWind International - Brasil

Introdução:

Na era da Produção Enxuta (Lean Manufacturing), Seis Sigma e Indústria 4.0, e mais recentemente 5.0, a medição precisa de peças e componentes é um dos pilares para garantir qualidade do produto. No entanto, métodos tradicionais de inspeção — como paquímetros, micrômetros e projetores de perfil e até mesmo equipamentos de medição 3D — ainda resultam em algum nível de desperdício e longos tempos dos ciclos de medição. Este trabalho apresenta o **VisionLab**, um sistema ótico de medição 3D, automatizado, capaz de realizar até 50 medições por peça em menos de 5 segundos, proporcionando ganhos significativos em eficiência e qualidade no produto e do controle de processo.

Palavras-chave
#inspeção dimensional, #medição 3D, #qualidade, #medição ótica, #Indústria 4.0, #6 Sigma

A indústria de conformação a frio e forjamento de peças de revolução, enfrenta exigências cada vez maiores em termos de precisão dimensional e qualidade e tempos de medição. Programas de Seis Sigma e metodologias de Produção Enxuta têm sido amplamente adotados pela indústria, mas ainda existem gargalos quando a medição depende de métodos convencionais, normalmente demorados e sujeitos a variabilidade entre operadores.
Neste contexto, cresce a demanda por sistemas de inspeção 3D automatizados, capazes de fornecer resultados mais rápidos, consistentes e integrados aos modernos processos de manufatura.

Fatores Limitantes dos Métodos Convencionais de Medição

Os métodos tradicionais apresentam limitações relevantes:

- Tempo elevado de inspeção: até 45 minutos para primeira peça, quando o número de cotas é elevado.

- Variabilidade: leituras diferentes entre operadores, mesmo com instrumentos calibrados.

- Visão limitada: equipamentos que oferecem apenas medições bidimensionais não representam adequadamente peças que interagem em 3D.

- Impacto no fluxo produtivo: interrupções para medições manuais reduzem a eficiência da produção e OEE.

- Impossibilidade de utilização generalizada de equipamentos de medição 3D de laboratório, em todas as peças produzidas em todas as máquinas conformadoras.

O Sistema VisionLab

O **VisionLab** é um sistema de medição ótica, tridimensional por visão, desenvolvido pela **General Inspection**, que combina rapidez, precisão e repetibilidade:

- Até 50 medições por peça em menos de 5 segundos.

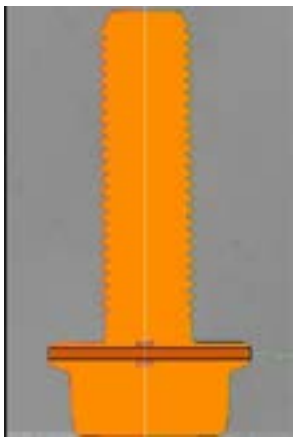
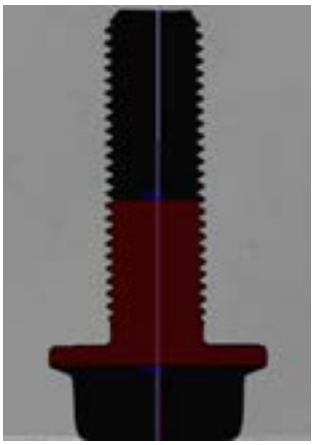
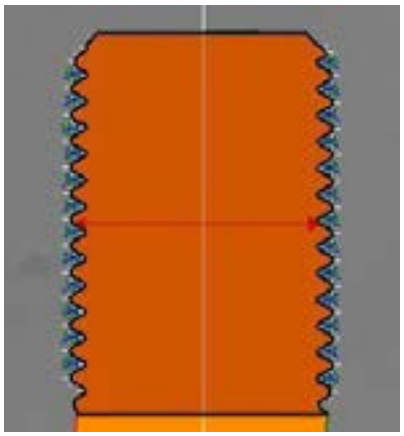
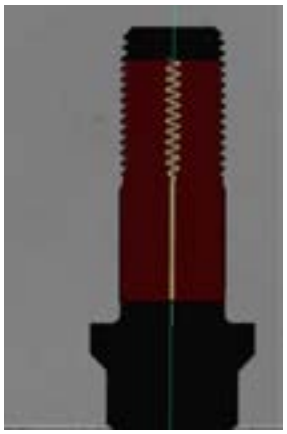
- Precisão de até 2 mícrons em diâmetros, e disponível nos modelos para medições de até 75mm, 100mm, 150mm, 300mm e 600mm de comprimento.

- Cobertura de 95% das características dimensionais críticas tais como roscas, comprimentos, diâmetros, raios, altura de cabeça, concentricidade, defeitos superficiais e tolerâncias GD&T (Dimensionamento e Tolerância Geométrica).

- Disponível em versões de laboratório e de chão de fábrica.

-O sistema elimina a variabilidade nas leituras dimensionais entre operadores, reduz o refugo por falhas de medição em primeira peça e minimiza retrabalho, garantindo inspeções mais frequentes e consistentes.

-O VisionLab possui um banco de dados de roscas métricas e polegada, para configuração automática, identificando o tipo de rosca, bitola, passo, ângulo do filete, diâmetros externo, flanco e diâmetro menor e raios automaticamente.

Resultados e Benefícios

Fabricantes que adotaram o **VisionLab** relatam ganhos expressivos:

- Melhoria de 40 a 60% na Eficiência Global dos Equipamentos (OEE), vinculada aos tempos de medições.

- Redução do tempo de PPAP de até 5 dias para menos de 5 horas.

- Retorno sobre investimento (ROI) inferior a 6 meses, dependendo do número de máquinas de produção atendidas.

- Redução significativa de sucata e retrabalho.

- Maior estabilidade e confiabilidade dimensional do processo produtivo.

Integração com a Indústria 4.0

O **VisionLab** permite integração direta com bancos de dados e softwares de Controle Estatístico de Processo (CEP) onde os dados são exportados automaticamente para Excel ou outros sistemas, eliminando registros manuais, vieses de operador e gargalos de inspeção.

Essa conectividade fortalece a manufatura digital e permite um controle de processo em tempo real, alinhado aos princípios da Indústria 4.0.

Acesso Remoto para atualizações e demonstrações on-line

A General Inspection mantém acesso remoto via Internet em todos os equipamentos **VisionLab** fornecidos aos seus clientes, para upgrade de atualizações de software, serviço de suporte e assistência técnica.

O fabricante disponibiliza, mediante agendamento, testes e demonstrações on-line aos interessados no **VisionLab.**

Conclusão:

A medição 3D automatizada representa um avanço fundamental para a indústria de conformação a frio em prensas automáticas, substituindo métodos convencionais, lentos e suscetíveis a erros, por uma solução rápida, precisa e repetitiva. O **VisionLab** se mostra uma solução estratégica para fabricantes que buscam melhorar sua qualidade, eficiência e competitividade.
Para maiores informações ou para agendar demonstrações, os interessados podem entrar em contato com a representante a **SouthWind International**, representante exclusivo na América Latina, através do e-mail swind@southwind.com.br .

44º SENAFOR

28th International Forging Conference
14th International Sheet Metal Forming Conference / 11th BrDDRG Congress
14th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies – Brazil/RS
3th International Conference on Innovation in Materials and Manufacturing
Hotel Plaza São Rafael – P. Alegre RS, October 1-3, 2025

Experience of analysis and design of a forging line based on thermal and productivity specification using ELTA / 2DELTA program.

Experiência de análise e projeto de uma linha de forjamento com base na especificação térmica e de produtividade usando o programa ELTA / 2DELTA.

José Carlos Zerbini [(1)]
Alexandr N. Ivanov [(2)]
Eduardo Baptistelli [(2)]

ABSTRACT

Electro Thermal programs were used for analysis and design of a forging line based on thermal and productivity specification. Inductor line length, inverter frequency and impedance matching were addressed to meet billet heating work program. Experimental results and simulations for cylindrical billet steel work program specification are presented.

Special attention in this project was paid to design a unique heating line able to run in two frequencies trough a change in the connection to the capacitor bank of the heat station. This multitask project involves expertise on engineering thermal specification, electrothermal programs, mechanical design, load matching of inverter and heat station.

Key words — induction heating, induction forging line design, ELTA and 2DELTA programs, load and inverter matching and capacitor bank setup.

[(1)] Eng., Synergetica Sistemas e Processos, zerbini@synergeticasp.com.br
[(2)] Dr., Saint-Petersburg Electrotechnical University (LETI), Russia; anivanov@etu.ru
[(2)] Mec. Designer, Eduardo Baptistelli, ebaptistelli@gmail.com

1. Introdução

A experiência acumulada na análise de processos de aquecimento para forja, validação de uso, e projetos de linhas de aquecimento indutivo com o ELTA / 2DELTA [1], [2], [3] permite adotar uma boa abordagem visando o projeto térmico, elétrico e de casamento de impedância em novas aplicações. Eventualmente surgem situações onde temos uma diferença signficativa entre os valores calculados e os dados experimentais. Alguns dados de entrada de projeto são estimados incialmente pois dependem das características construtivas do conversor de frequência e da conexão com a estação de aquecimento.

Tipicamente as fontes de potência convertem a energia da rede elétrica trifásica (50/60 Hz) em continua, e depois em alternada na frequência selecionado para o projeto. Normalmente na fase de projeto dos sistemas de aquecimento indutivo uma boa prática é limitar a perda de transmissão na potência e de tensão de média frequência em 1% e 5 % respectivamente. As diferenças que ocorrem entre o valor estimado e o realizado estão associados às perdas de transmissão desde a rede elétrica (50Hz ou 60 HZ) até a conexão aos terminais dos indutores de aquecimento.

A abordagem a ser utilizada para o casamento de impedância entre o conversor de frequência / estação de aquecimento e a linha de indutores de aquecimento depende da tecnologia empregada na fonte de potência de média frequência (paralelo, série, série paralelo, etc.). A figura 1 mostra a representação esquemática de um conversor paralelo (fonte de corrente) utilizado neste trabalho. A equação 1 permite calcular a impedância Z do banco de capacitores (C) associado à linha de indutores (R e L) [4].

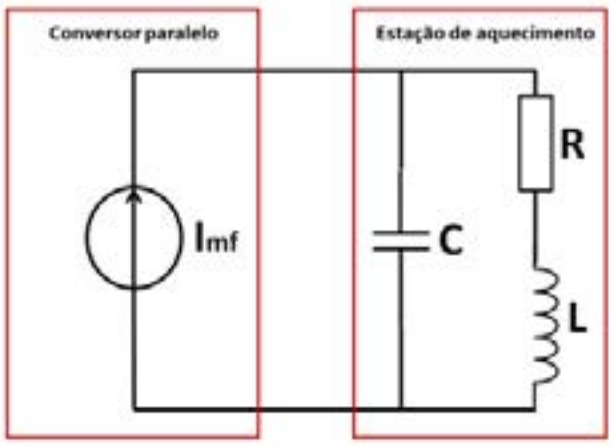


Figura 1

$$Z = \frac{(R_L + jX_L) \times (-jXc)}{(R_L + j(X_L - Xc)}$$

Equação 1

Depois das simulações no software eletrotérmico ELTA 7.0 e seleção da melhor variante que atenda a especificação do projeto térmico e de produção também é necessário confirmar se temos o correto casamento de impedância entre o conversor paralelo e a estação de aquecimento. Uma vez que o conversor opera em modo de regulação de tensão, set point de Umf, a equação 2 permite obter a admitância equivalente total da estação de aquecimento Y, e a partir daí calcular o valor da corrente de média frequência que deve ser fornecida através da equação 3.

$$Y = \frac{R_L}{(R^2_L + \omega^2 L^2)} + j\left(\omega C - \frac{(\omega L)}{(R^2_L + \omega^2 L^2)}\right)$$

Equação 2

$$Imf = Umf * Y$$

Equação 3

Igualando a parte imaginária da equação 2 a zero, obtem-se a equação 4 que permite calcular a frequência de ressonância do circuito oscilante.

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \cdot \sqrt{1 - \frac{R^2_L C}{L}}$$

Equação 4

A figura 2 mostra a forma de onda da tensão (Umf) e corrente (Imf) de média frequência na saída do conversor paralelo [5].

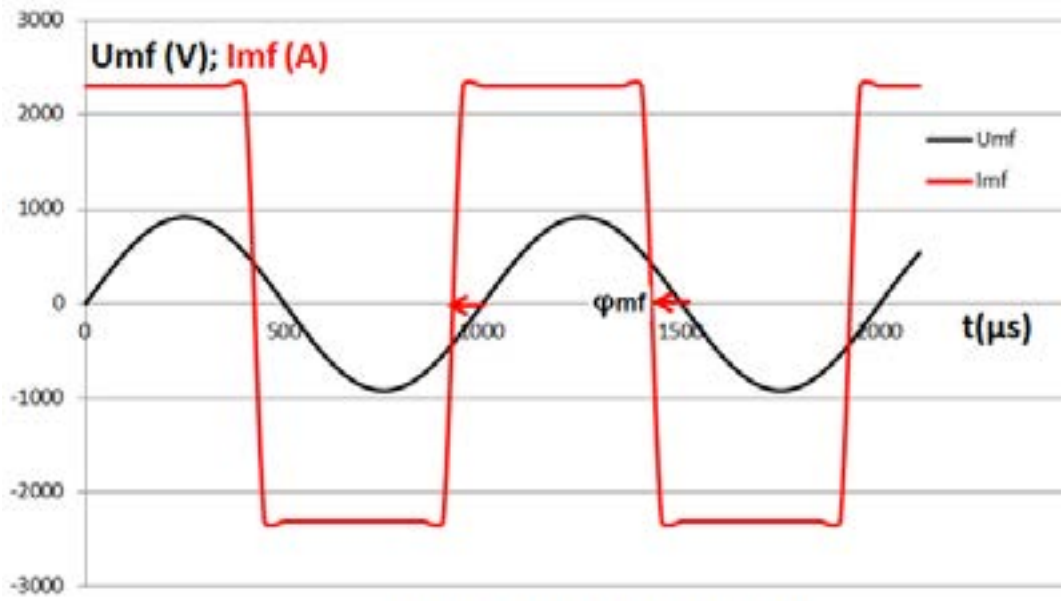


Figura 2: Umf (t) e Imf (t)

A equação 5 permite calcular o valor da potência fornecida para a estação de aquecimento.

$$Pmf = \left(\frac{2 * \sqrt{2}}{\pi} * Imf\right) * Umf * \cos(\varphi mf)$$

Equação 5

Seleção da frequência e tempo de aquecimento mínimo:

Podemos estabelecer critérios para a seleção da frequência da corrente induzida na aplicação de aquecimento total para forja, em função do raio do tarugo [R]. Tal critério é denominado fator m [6] e pode ser calculado a partir da equação 6, onde δ é a profundidade de penetração da corrente induzida na peça.

$$m = R.\frac{\sqrt{2}}{\delta}$$

Equação 6

O gráfico apresentado na Figura 3 foi calculado utilizando o aço SAE 1045 e pode ser utilizado como referência para os aços carbono em geral.

Seleção da frequência:	Frequência	Fator m
$f_{mínima}$ satisfatória	f_c	2,0
$f_{ótima}$ pelo critério de eficiência elétrica	f_a	2,5
$f_{máxima}$ satisfatória	f_d	5,0
$f_{máxima}$ pelo critério de eficiência térmica	f_b	7,0

Tabela 2: Seleção da frequência em função do fator m

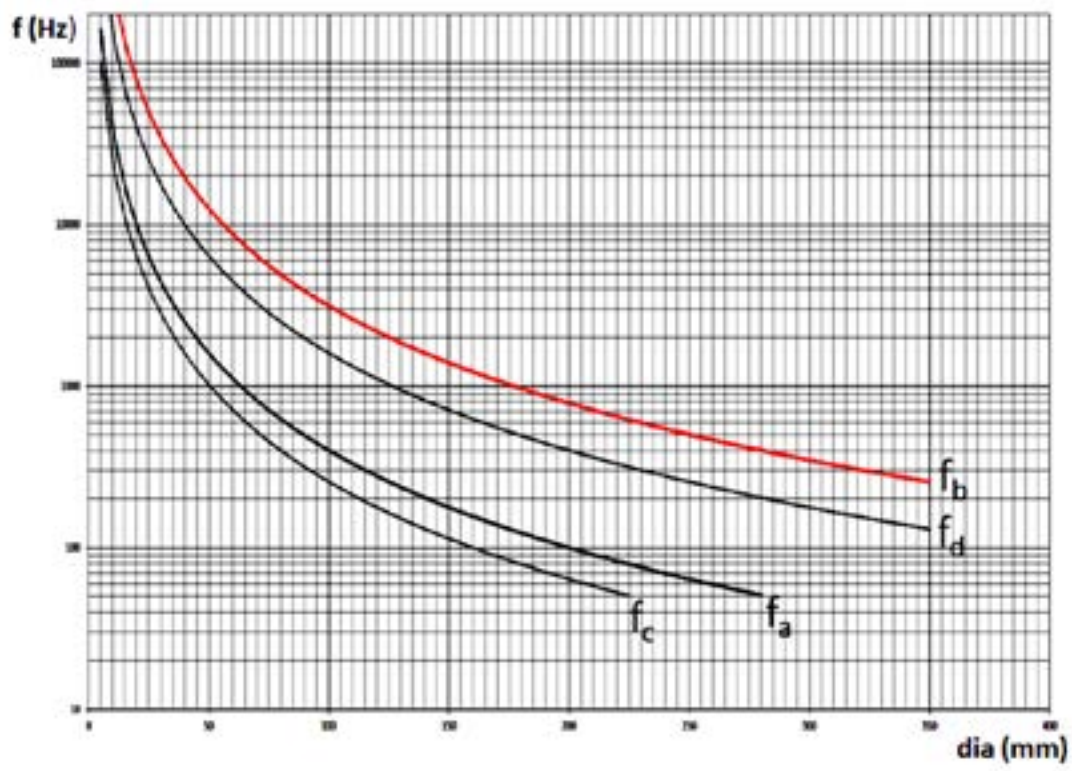


Figura 3: Gráfico de seleção da frequência para aço SAE 1045.

O gráfico da figura 4 permite estimar o tempo de aquecimento para um Δt (°C) entre centro e superfície de aproximadamente 50 °C na condição de m = 2,5.

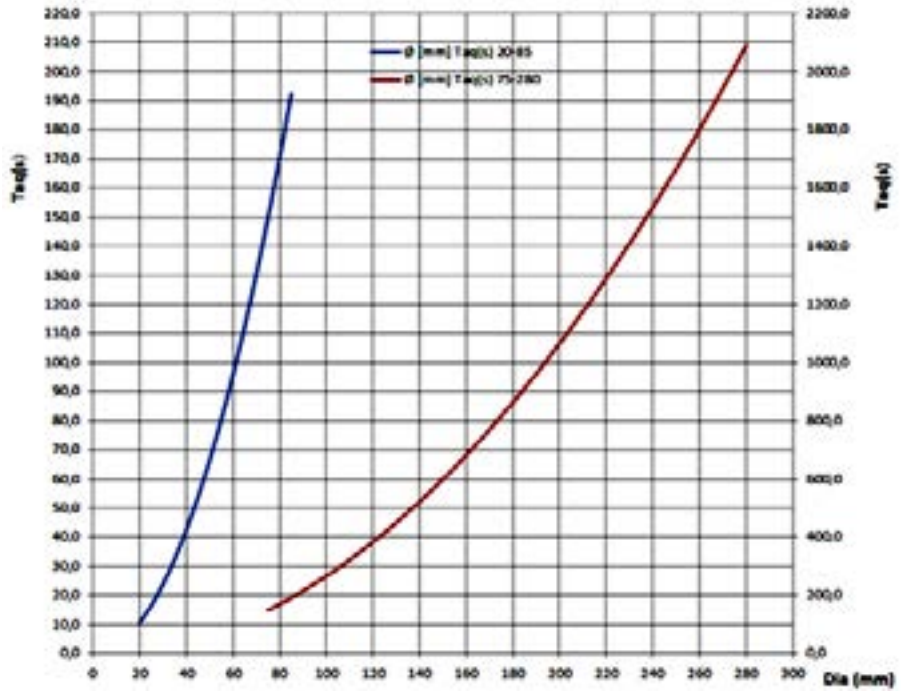


Figura 4: Gráfico para tempo aquecimento total em função do diâmetro (m=2,5)

Através dos gráficos apresentado nas figuras 3 e 4 podemos determinar a frequência de operação e o tempo mínimo de aquecimento para os tarugos de maior e menor diâmetro do projeto.

2. Programa de trabalho e fonte potência

Características do conversor de frequência utilizado nesta aplicação: tipo paralelo

Pmf = 1400 kW ; Umf = 650 V ; Imf = 2340 A ; Fmf = de 700 a 1800 Hz

Diâmetro peça (mm)	Produção (kg/h)	Temperatura (°C)	Δt (°C)
76,2	**2920**	**1250**	**50**
69,0	**2170**	**1250**	**50**
52,0	**1020**	**1250**	**50**

Tabela 1: Programa de trabalho: material aço carbono

Em primeiro lugar devemos selecionar a frequência e posteriormente o tempo total na linha de aquecimento.Para este programa de trabalho, as frequências ótimas determinadas pelo critério de eficiência elétrica (f_a) e os tempos mínimos para o aquecimento total são, 700 Hz e 1500 Hz, e 170 s e 70 s, respectivamente para os diâmetros 76,2 mm e 52 mm.

Em função da produção de projeto teremos para o diâmetro de 76,2 mm um comprimento mínimo de linha de aquecimento de 3900 mm e para o diâmetro de 52 mm um de 1200 mm.

Foi selecionado os valores de frequência, de 850 Hz, 830 Hz e 1500 Hz para os diâmetros de 76,2 mm, 69 mm e 52 mm nas simulações com o software eletrotérmico obtendo–se a melhor a variante para atender o programa de trabalho.

Indutor	A1	B2	C3	D4
L indutor (mm)	1200	1200	1200	1200
Dia Cobre (mm)	132	132	132	132
Dia refratário (mm)	102	102	102	102
L cobre (mm)	1170	1170	1170	1170
Número espiras	20	36	36	36

Tabela 3: Variante selecionada para os indutores de aquecimento

Para o diâmetro de 52 mm os indutores B2, C3 e D4 foram conectados em paralelo ao banco de capacitores da estação de aquecimento, figura 5A. O indutor A1 permaneceu na linha de aquecimento porém sem conexão elétrica. Nos demais casos os indutores A1 e B2 em série, e C3 e D4 em série, foram conectados ao banco de capacitores, figura 5B. A figura 5C mostra o corte transversal do indutor.

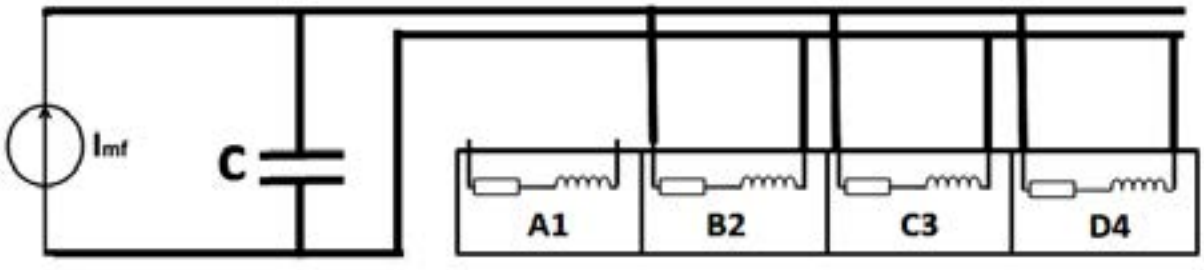


Figura 5A: Diagrama de conexões dos indutores para diâmetro de 52 mm

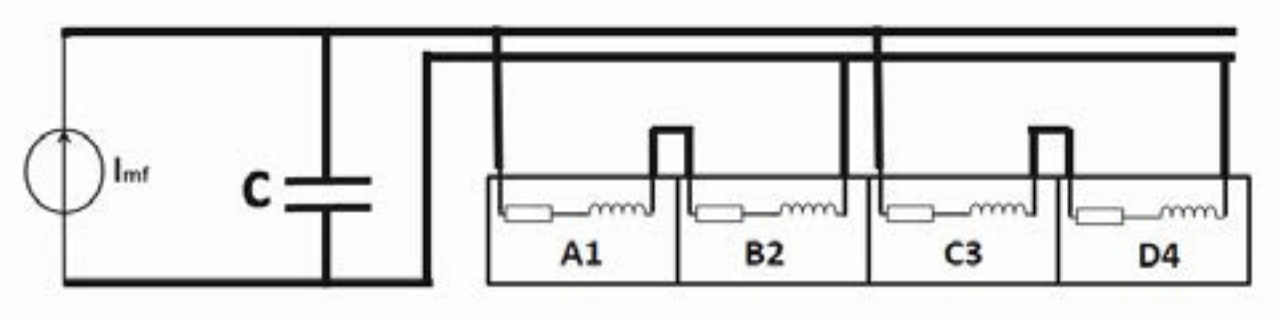


Figura 5B: Diagrama de conexões dos indutores para diâmetros de 76,2 e 69 mm

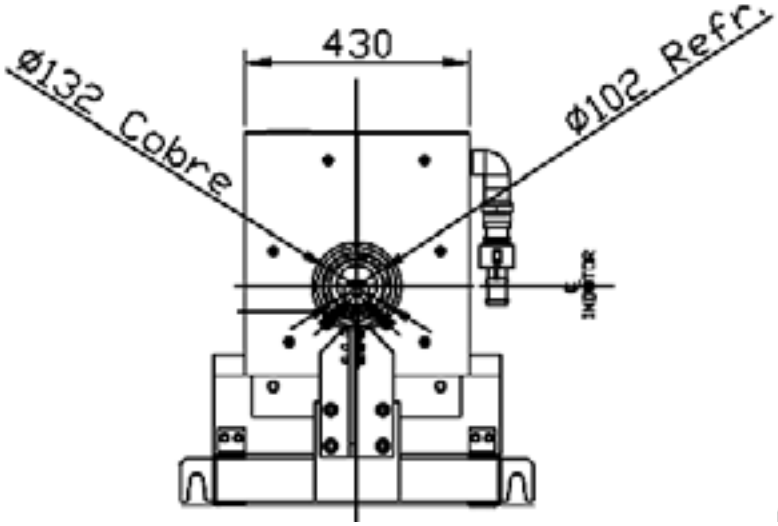


Figura 5C: Corte transversal do indutor

3. Simulações eletrotérmicas no ELTA 7.0 e dados experimentais [7]

Na sequência temos para a variante de indutores selecionada (tabela 3 e figura 5), as simulações do software eletrotérmico para a evolução da temperatura ao longo da linha de aquecimento, figuras 6A, 6B, 6C e os resultados calculados e experimentais tabelas 4A, 4B, 4C..

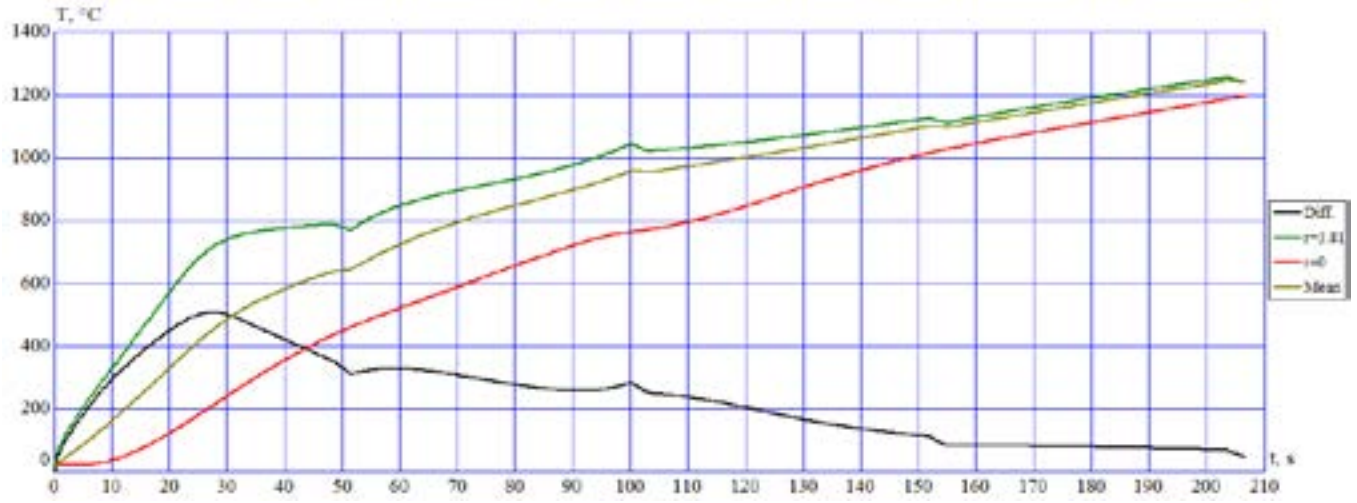


Figura 6A: Diâmetro 76,2 mm ; 2920 kg/h ; 850 Hz

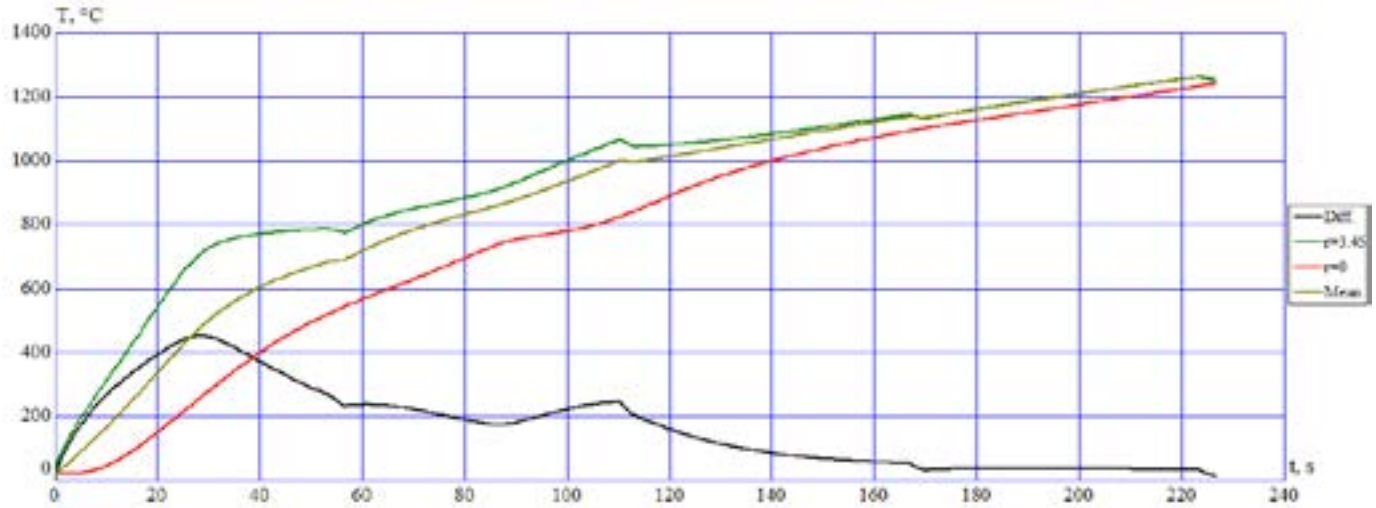


Figura 6B: Diâmetro 69 mm ; 2170 kg/h ; 830 Hz

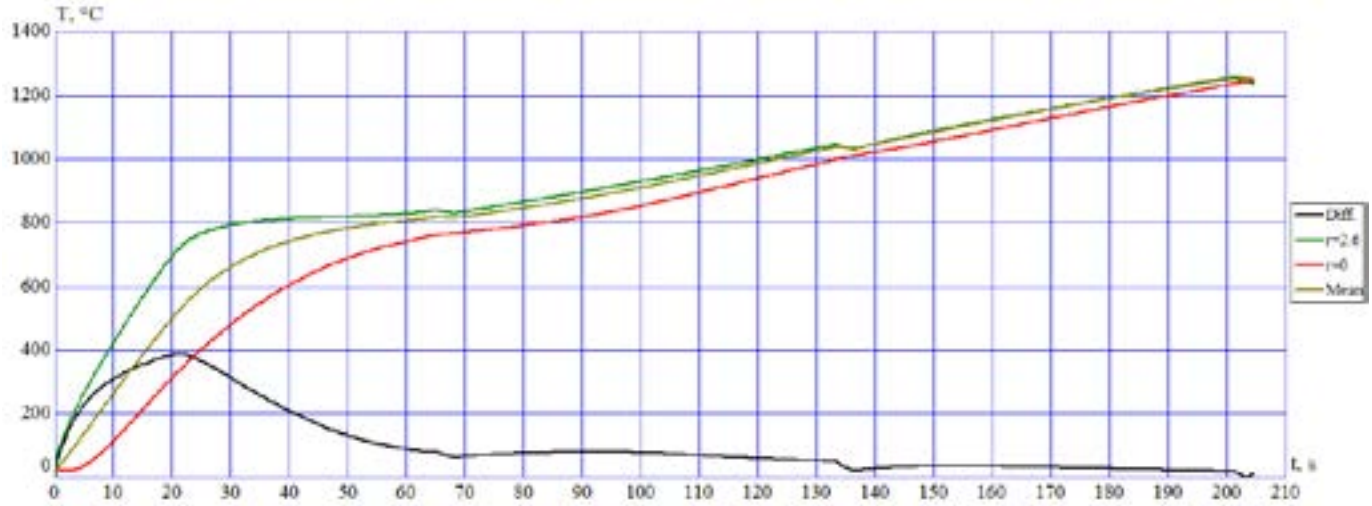


Figura 6C: Diâmetro 52 mm; 1020 kg/h ; 1500 Hz

Simulação processo diâmetro 76,2 mm @ 850 Hz @ 2920 kg/h					
Indutor	A1	B2	C3	D4	Total
Indutor (A)	4573	4573	3155	3155	7728
U indutor (V)	168,73	384,87	276,29	277,12	553,5
P indutor (kW)	361,68	388,85	162,86	163,54	1076,9
Z indutor (Ω)	0,036898	0,084161	0,087573	0,087834	0,07162
PF indutor	0,46619	0,22119	0,018683	0,18705	0,2518
		X indutor (Ω)	0,069316		
R indutor (Ω)	0,018032	L indutor (μH)	12,98	U indutor (V)	553,5
R eq trilho Ω)	0,000871	Leq perdas (μH)	0,31	Ueq perdas (V)	13,2
R_L (Ω)	0,018903	L(μH)	13,29	Umf (V)	566,7
P trilho est (kW)	55 w/cm	P trilho est (kW)	52	Pmf (kW)	1129

Comparativo entre a simulação e o experimento		
	Valores calculados	**Valores Experimentais**
Prod (kg/h)	2920	2920
T (^{o}C)	1252	1260
dT (^{o}C)	50	X
Pmf (kW)	1129	1095
Umf (V)	566,7 ∠0	592 ∠0
Fmf (Hz)	850	812
Tmf/2 (μs)	588,2	615,8
R_L (Ω)	0,018032	0,01663
L(μH)	13,29	13,92
C (μF)	2245	2486
Fress (Hz)	893,2	834
Y (S)	3,50443 – j 1,16717	3,1231 –j 0,66
Y (S)	3,50443 ∠-18,42	3,1231 ∠-11,93
φmf (^{o}elétricos)	18,42^o	12^o
Tempo φmf exp (μs)	60,2	41
Imf fund = Umf * Y(S)	2093 ∠-18,42	1890 ∠-12
Iconv (A)	2326	2100
Pmf (kW)	1128	1095
Cons (kWh/t)	386,3	375

Tabela 4A: dia 73,2 mm @ 2920 kg/h

Simulação processo diâmetro 69 mm @ 830 Hz @ 2170 kg/h					
Indutor	A1	B2	C3	D4	Total
Indutor (A)	4435	4435	3030	3030	7465
U indutor (V)	158,41	386,61	271,7	272,3	544,5
P indutor (kW)	299	309,96	130,57	130,66	870,2
Z indutor (Ω)	0,035717	0,087173	0,089671	0,089686	0,07294
PF indutor	0,42084	0,18129	0,15861	0,18836	0,2141
		X indutor (Ω)	0,07125		
R indutor (Ω)	0,015615	L indutor (μH)	13,66	U indutor (V)	544,5
R eq trilho Ω)	0,000933	Leq perdas (μH)	0,40	Ueq perdas (V)	16,0
R_L (Ω)	0,016549	L(μH)	14,06	Umf (V)	560,5
P trilho est (kW)	55 w/cm	P trilho est (kW)	52	Pmf (kW)	922,2

Comparativo entre a simulação e o experimento		
	Valores calculados	**Valores Experimentais**
Prod (kg/h)	2170	2170
T (^{o}C)	1255	1260
dT (^{o}C)	30	x
Pmf (kW)	922,2	895
Umf (V)	560,5 ∠0	580 ∠0
Fmf (Hz)	830	800
Tmf/2 (μs)	602,4	625
R_L (Ω)	0,015615	001477,
L(μH)	14,06	14,52
C (μF)	2300	2486
Fress (Hz)	864,8	821,8
Y (S)	2,92695 –j 0,97856	2,6625 –j 0,6636
Y (S)	2,92695 ∠-18,49	2,744 ∠-14
φmf (^{o}elétricos)	18,49^o	14^o
Tempo φmf exp (μs)	61,87	48,6
Imf fund = Umf * Y(S)	1729 ∠-18,49	1592 ∠-14
Iconv (A)	1922	1768
Pmf (kW)	920	895
Cons (kWh/t)	424	412,4

Tabela 4B: dia 69 mm @ 2170 kg/h

Simulação processo diâmetro 52 mm @ 1500 Hz @ 1020 kg/h					
Indutor	A1	B2	C3	D4	Total
Indutor (A)	X	2556,6	2708,6	2701,5	7966,9
U indutor (V)	X	450	450	450	450
P indutor (kW)	X	220,89	117,73	117,30	456
Z indutor (Ω)	X	0,17846	0,16613	0,16657	0,05648
PF indutor	X	0,2013	0,096586	0,096524	0,1272
		X indutor (Ω)	0,056025		
R indutor (Ω)	0,007184	L indutor (μH)	5,94	U indutor (V)	450
R eq trilho Ω)	0,000614	Leq perdas (μH)	0,25	Ueq perdas (V)	18,9
R_L (Ω)	0,007798	L(μH)	6,19	Umf (V)	468,9
P trilho est (kW)	55 w/cm	P trilho est (kW)	6,19	Pmf (kW)	495

Comparativo entre a simulação e o experimento		
	Valores calculados	**Valores Experimentais**
Prod (kg/h)	1020	1020
T (^oC)	1252	1260
dT (^oC)	18	x
Pmf (kW)	495	616
Umf (V)	468,9 ⌊0	553 ⌊0
Fmf (Hz)	1500	1543
Tmf/2 (μs)	333,3	324,0
R_L (Ω)	0,007798	0,0102
L(μH)	6,19	7,25
C (μF)	1705	1356
Fress (Hz)	1535,8	1589
Y (S)	2,24854 –j 0,7619	2,0164 –j 0,7706
Y (S)	2,37412 ⌊-18,72	2,1613 ⌊-21,1
φmf (^{o}elétricos)	18,72^o	21,1^o
Tempo φmf exp (μs)	34,7	38
Imf fund = Umf * Y(S)	1113 ⌊-18,72	1195 ⌊-21,1
Iconv (A)	1237	1328
Pmf (kW)	494	616
Cons (kWh/t)	484,3	604

Tabela 4C: dia 52 mm @ 1020 kg/h

4. Conclusões:

As potências calculadas e experimentais são mostradas na tabela 5.

Diâmetro (mm)	Potência cálculo (kW)	Potência experimento (kW)	ΔP(exp-calc) (kW / %)
76,2	**1128**	**1095**	**(-33 / -3%)**
69	**920**	**895**	**(-25 / -2,7%)**
52	**494**	**616**	**(+124 / +24,7 %)**

Tabela 5: Valores da potência de cálculo e experimental

A potência de 24,7% acima do calculado para o diâmetro 52 mm foi identificada nas perdas perdas de transmissão nos barramentos que conectam os indutores ao banco de capacitores. Apesar da produção para o diâmetro 52 mm ser de aproximadamente 1/3 da do diâmetro 76,2 mm foi possível obter dois setups de capacitores para atender integralmente o programa de trabalho do projeto.

A premissa de utilizar dois setups de frequência mostrou-se acertada e foi comprovada no campo como podemos visualizar na distribuição de temperatura na saída do terceiro indutor, Δt (°C) positivo, para o diâmetro 52 operando em 1500 Hz, figura 7.

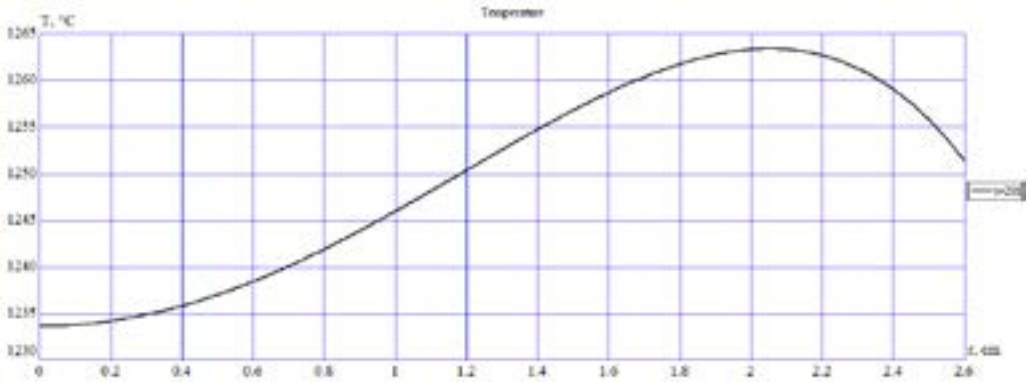


Figura 7: Distribuição de temperatura no diâmetro 52 mm ; 1020 kg/h e 1500 Hz

Podemos observar na figura 8, que caso fossem utilizados 4 indutores de aquecimento para o diâmetro de 52 mm a temperatura central já se igualaria à da superfície. após a saída do terceiro indutor.

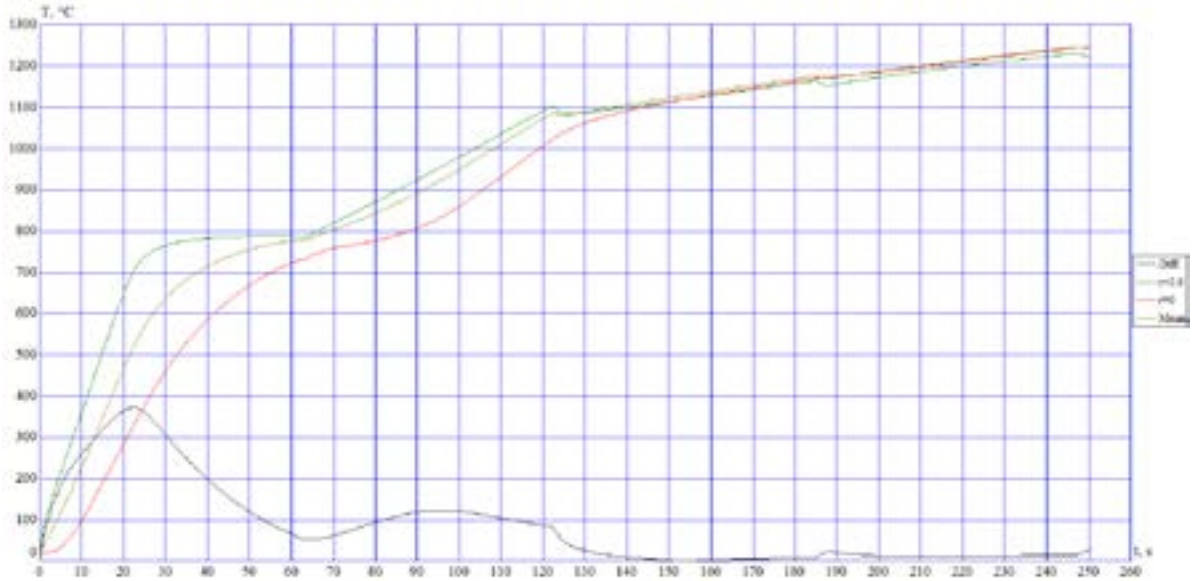


Figura 8: Gráfico de temperatura no diâmetro 52mm ; 1020 kg/h e 830 Hz

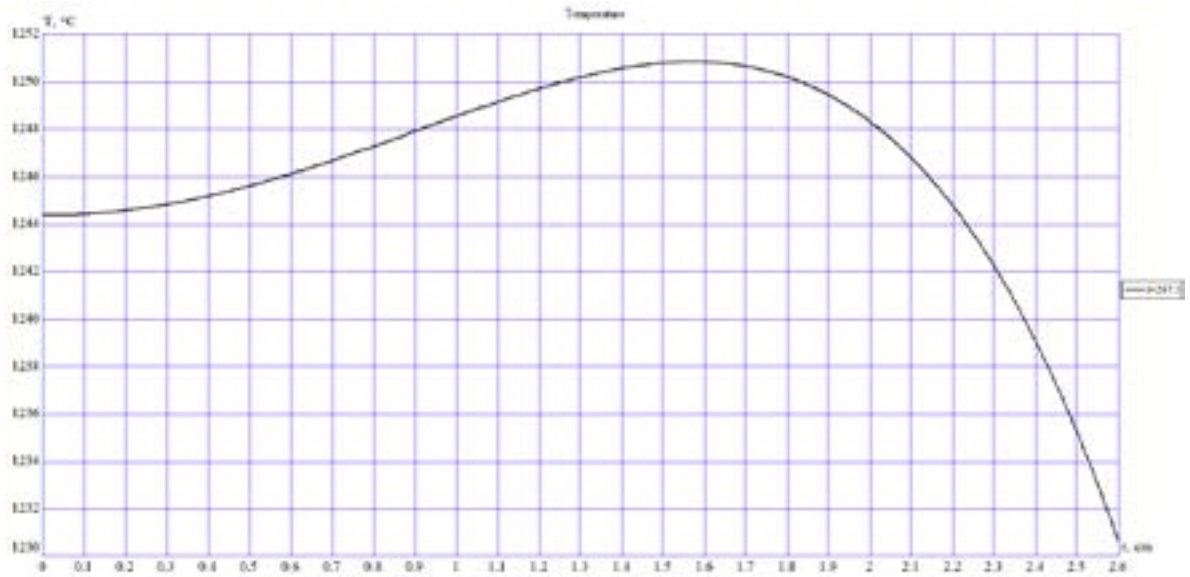


Figura 9: Distribuição de temperatura no diâmetro 52 mm utilizando 4 indutores t =247,5 s

[1]A figura 9 mostra que na saída da linha de aquecimento teríamos um Δt de -14°C em t=247,5 segundos. Outro detalhe importante, observado comumente no campo em situações similares é que ao se utilizar pirometria ótica, que mede apenas a temperatura superficial, na posição entre 1,5 e 1,7 cm, a partir do raio poderia haver temperatura suficientemente alta para provocar colagem de peças.

A abordagem utilizada no projeto térmico, projeto elétrico e a adequada execução do casamento de impedância entre o conversor e a estação de aquecimento permitiu operar em uma única linha de aquecimento todo o programa de trabalho.

5. Referências

[1] BUKANIN, V., IVANOV, A., ZERBINI J.C., Electrothermal analysis for effectiveness of induction forge heating, 37° SENAFOR, 2017, Brasil.

[2] Valentin S. Nemkov, Vladimir A. Bukanin, Alexander N. Ivanov, José Carlos Zerbini. Perspective of using electrothermal software programs in investigation of forge heating by induction. 36th SENAFOR 20th International Forging Conference. October 5-7, 2016, Porto Alegre, Brazil. P. 1-12.

[3] José Carlos Zerbini, Alexander Ivanov, Vladimir Bukanin, Ademir Angelo de Vasconcelos. Use of the ELTA software for study of electromagnetic and thermal processes in induction heating steel forging lines. 35th SENAFOR 19th International Forging Conference. October 7-9, 2015, Porto Alegre, Brazil. P. 1-15.

[4] Abramczuk, Chautard S.L., Elementos de teoria para eletro-eletrônica, Gráfica e Editora Rainha Lescal Ltda, 1.a edição, 1970, Rio de Janeiro, Brasil.

[5] Centre Français de L´Electrecite, Electromagnetic Induction and Eletric Conduction in Industry, 1997, originally published as: “Induction, conduction elétrique dans l´industrie” by Életricité de France – ISBN 2-86995-022-5.

[6] FRANCESCO, R., Thesys, Numerical Analysis of Ihmogeneous Inductive Heating for Forging Parts, 2014/2015, Università degli Studi di Padova, Leibniz Universität Hannover.

[7] Manuais do ELTA 7.0 e 2DELTA e simulações eltrotérmicas, www.nsgsoft.com.

44º SENAFOR

28th International Forging Conference
13th International Sheet Metal Forming Conference / 10th BrDDRG Congress
13th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies – Brazil/RS
2nd International Conference on Innovation in Materials and Manufacturing
Hotel Plaza São Rafael – P. Alegre RS, October 2-4, 2024

Caracterização da integridade superficial de uma matriz para forjamento a quente fabricada via *high speed milling*

Felipe Canal (1)
João Vitor Piovesan Dalla Nora (2)
Vinicius Waechter Dias (3)
Fernando Marques Michelon (4)
Alexandre da Silva Rocha (5)

RESUMO

Na usinagem de matrizes de forjamento a quente por fresamento CNC é necessário cautela para preservar a ferramenta e viabilizar o processo, fato que aumenta o tempo de fabricação. A usinagem *high speed milling,* caracterizada pela utilização de altas velocidades de corte, permite reduzir o tempo de fabricação de matrizes para forjamento a quente, além de, melhorar a qualidade superficial. Neste contexto, este estudo buscou comparar a fabricação de uma matriz entre a usinagem CNC comum e a usinagem *high speed milling*. O estudo demonstrou que o emprego da usinagem *high speed milling* pode reduzir a rugosidade e o tempo de processo. No entanto, para ambos os métodos a rugosidade é diferente ao longo do perfil da matriz devido a variação da velocidade de corte causado pela mudança do ponto de contato da ferramenta com a superfície da peça. Esse comportamento afetou a topografia, promovendo defeitos de superfície.

Palavras chaves: matriz, usinagem, *high speed milling,* rugosidade.

Characterization of the surface integrity of a hot forging die manufactured via high-speed milling

ABSTRACT

In the machining of hot forging dies by CNC milling, caution is required to preserve the tool and ensure process feasibility, which increases manufacturing time. High speed milling, characterized by the use of high cutting speeds, makes it possible to reduce the manufacturing time of hot forging dies while also improving surface quality. Therefore, this study aimed to compare the manufacturing of a die using conventional CNC milling and high-speed milling. The results showed that the use of high-speed milling can reduce both roughness and process time. However, for both methods, roughness varies along the die profile due to changes in cutting speed caused by the variation of the tool contact point with the workpiece surface. This behavior affects surface topography, leading to the formation of defects.

Keywords: die, machining, high speed milling, roughness.

1. INTRODUÇÃO

O ferramental para forjamento a quente possui alto custo, sendo que o processo de usinagem da matriz pode atingir 65 % do custo de produção do ferramental [1] [2]. Para tal, a otimização quanto ao tempo e custo de produção e a busca pelo aumento da vida útil desses ferramentais é essencial para alavancar a viabilidade do processo.

A integridade superficial obtida na matriz após a usinagem é fundamental para a ferramenta. Quando necessário tratamentos superficiais, requisitos mínimos de rugosidade são requeridos para que a nitretação ou revestimento atinjam as propriedades desejadas e tenham desempenho satisfatório durante o forjamento a quente [3]. Além disso, a rugosidade pode auxiliar na retenção de lubrificante, reduzindo o atrito e esforços durante a conformação e por consequência preservar a superfície da ferramenta e prolongar sua vida útil [4]. Além da rugosidade, avaliar os defeitos originados durante o corte (oriundos da usinagem) na topografia pode auxiliar a otimizar e melhorar a superfície de modo a evitar danos relacionados ao desgaste prematuro e possibilidades de propagação de trincas em regiões críticas da matriz.

A usinagem *high speed milling* é um processo caraterizado por utilizar velocidades de corte entre 5 a 10 vezes superiores as convencionais, estando em uma faixa de rotação entre 10.000 a 50.000 rpm [5] [6]. Essa velocidade de corte depende do material a ser usinado. Outras definições relacionam o diâmetro do *spindle* e a rotação máxima, estabelecendo que, para ser considerado *high speed,* essa relação deve estar entre 1,5 a 2 milhões [7]. Outras terminologias podem ser encontradas para descrever o processo como *high cutting speed machining, high speed and feed rate machining, high spindle speed machining* [7]. Além da alta velocidade de corte outra característica do processo é a baixa profundidade de corte aliada ao maior avanço a qual permite melhor qualidade superficial e controle dimensional. Ainda, a baixa profundidade de corte tende a reduzir a força de corte e permite melhor controle

térmico na região usinada.

A usinagem de matrizes via *high speed milling* contribui tanto na produtividade quanto na qualidade final do produto, com economia de tempo de processo em até 51 % [5]. Estudos apontam que a utilização da usinagem *high speed milling* para uma matriz de forjamento pode reduzir em até 56 % o custo por peça [8]. Essa tecnologia demonstra grande potencial quanto a produtividade e qualidade superficial final, alcançando resultados expressivos para indústria de moldes e matrizes. Porém, estudos abordando o impacto da topografia modificada pela usinagem e como isso pode ser otimizado de forma a beneficiar o processo ainda são escassos. Este trabalho aplicou a usinagem *high speed milling* a uma matriz para forjamento a quente e investigou as características superficiais em termos de rugosidade, padrão e possibilidade de danos a topografia e tempo de processo.

2. METODOLOGIA

Foi utilizado o aço ferramenta AISI H13 conforme composição química na Tabela 1 a seguir.

Tabela 1 - Composição química do aço ferramenta AISI H13 (% massa).

C	Mn	Si	Cr	Mo	V
0,32 – 0,45	0,20 – 0,60	0,80 – 1,20	4,75 – 5,50	1,10 – 1,75	0,80 – 1,20

Previamente aos ensaios de usinagem, a partir do material com diâmetro de 2” no estado recozido, foi fabricado uma pré forma (Figura 1 (a)). Logo após, a mesma foi submetida ao tratamento térmico de têmpera e revenimento atingindo uma dureza final de 47 ± 1 HRC.

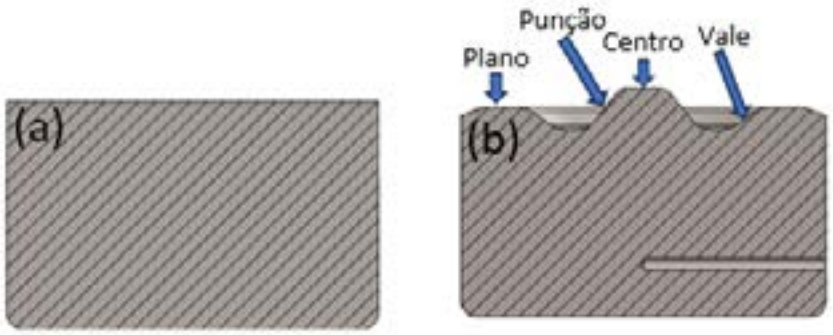


Figura 1 – (a) Pré forma (b) geometria da matriz e regiões.

Em seguida as amostras foram encaminhadas para a usinagem *high speed milling* no centro de usinagem Robodrill Fanuc αT14iF com rotação máxima de 24.000 rpm. A ferramenta de corte utilizada no passe de acabamento foi a fresa esférica Ø 4 mm. A Figura 1 (b) apresenta a geometria da matriz usinada. Para cada combinação de parâmetros de corte foram utilizadas ferramentas novas. A estratégia de usinagem adotada (*tool path*) foi espiral no sentido de fora para dentro.

A Tabela 2 descreve os parâmetros de corte avaliados, sendo uma condição CNC “comum” e uma condição *high speed milling.*

Tabela 2 – Parâmetros de corte para as condições avaliadas.

Condição	Velocidade de Corte	Profundidade de Corte (Ap e Ae)	Avanço
CNC “comum” *High speed Milling*	85 m/min. 170 m/min.	0,05 mm	0,08 mm/dente

Após a fabricação, as matrizes foram conduzidas as análises. A rugosidade foi realizada com o rugosímetro modelo Mitutoyo - SJ-210. O rugosímetro foi calibrado a partir um corpo de prova padrão do próprio instrumento. As amostras apresentaram um perfil periódico e se adequaram a um *cut-off* de 0,8 mm. O comprimento de medição utilizado foi de 2 mm. Os parâmetros avaliados foram R_a, R_p, R_v e R_z. As medições foram realizadas no sentido ortogonal ao avanço da ferramenta.

As imagens da topografia das matrizes foram avaliadas no microscópio MEV Zeiss EVO M10 no centro de microscopia e microanálise – UFRGS.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 2 apresenta os resultados de rugosidade para os parâmetros R_a, R_v, R_p e R_z em diferentes regiões classificadas como Plana, Centro, Ângulo e Punção. A Figura 1 (b) indica essas regiões na matriz.

Para ambas as condições a rugosidade é distinta para as diferentes regiões analisadas, sendo maior para regiões plana e centro. Esse comportamento está relacionado ao diâmetro efetivo de corte da ferramenta durante a usinagem. A velocidade de corte é calculada considerando o diâmetro nominal da ferramenta. No entanto, na usinagem de superfícies livres o diâmetro efetivo é constantemente modificado, o que afeta a velocidade de corte efetiva e prejudica a rugosidade final. A região mais crítica para ferramentas esféricas (*ball nose)* são regiões planas, onde a velocidade de corte tende a zero. Esse fenômeno é mais prejudicial na usinagem com máquinas três eixos não permitindo a otimização do contato da ferramenta com a superfície da peça. Máquinas CNC’s de cinco eixos tendem a reduzir esse efeito.

Avaliando as condições propostas, para condição de usinagem comum a rugosidade R_a foi ≥ 0,4 µm para todas as condições enquanto a condição *high speed milling* foi levemente inferior à 0,4 µm. No entanto, é importante considerar os parâmetros R_p (distância entre o pico mais alto e a linha média) e R_v (distância entre o vale mais profundo e a linha média) os quais somados compõem o parâmetro R_z (média dos cinco maiores picos e vales). Para condição *high speed* temos valores moderados em ambas as regiões, o que indica maior homogeneidade na superfície da matriz.

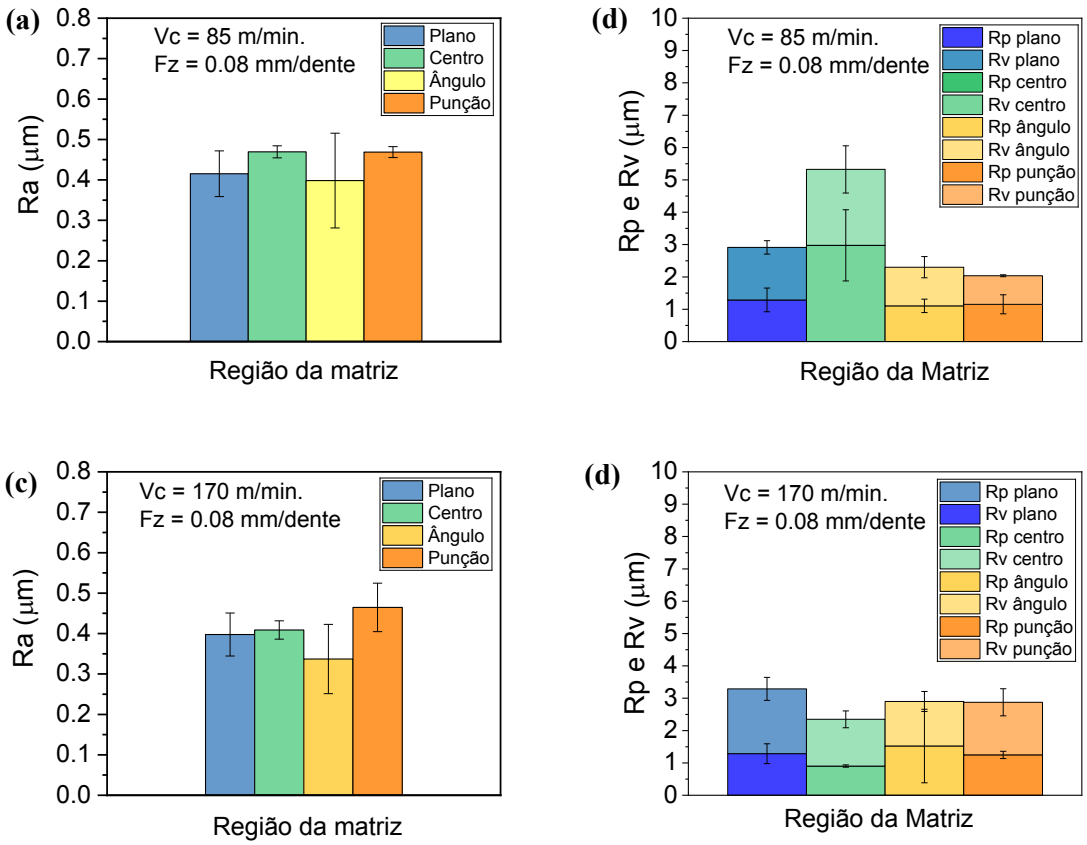


Figura 2 – Rugosidade para cada região da matriz sendo (a) Ra CNC comum (b) R_p e R_v CNC comum (c) R_a *High speed* (d) R_p e R_v *High speed.*

As Figuras 3 e 4 apresentam a topografia para diferentes regiões para as condições CNC “comum” e *high speed milling*. As regiões em que ocorre a usinagem com a ponta da ferramenta e, portanto, a velocidade de corte baixa, percebe-se que a superfície sofre maiores danos devido ao mecanismo de corte atuante na região. Já as regiões angulares e consequente maior velocidade de corte apresentam uma superfície mais homogênea e lisa. Assim, apesar de obter rugosidade próxima entre as regiões, quando observado a topografia é perceptível a influência da velocidade de corte sobre a superfície.

Na usinagem via *high speed milling* esse efeito é mais leve, mas ainda presente na superfície. Relacionando as condições propostas, a usinagem *high speed milling* promoveu uma superfície mais homogênea ainda que, não foi obtido uma superfície livre de danos nas regiões planas. Esse comportamento não diz respeito aos parâmetros e método de usinagem, mas sim a posição de contato da ponta da ferramenta esférica, apresentando baixa velocidade de corte. Para minimizar esses efeitos, a utilização de máquinas 5 eixos se tornariam mais adequada, permitindo manter um diâmetro de contato quase constante.

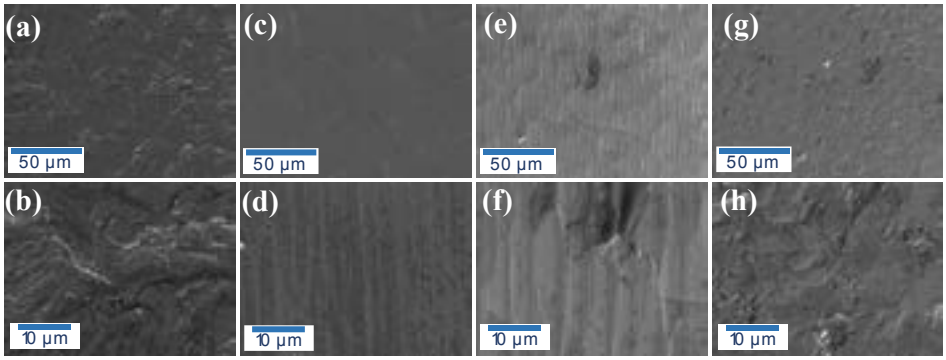


Figura 4 – Topografia usinada para Vc = 85 m/min. Fz = 0,08 mm/dente nas regiões plana (a) e (b); ângulo (c) e (d); ângulo punção (e) e (f) e centro (g) e (h).

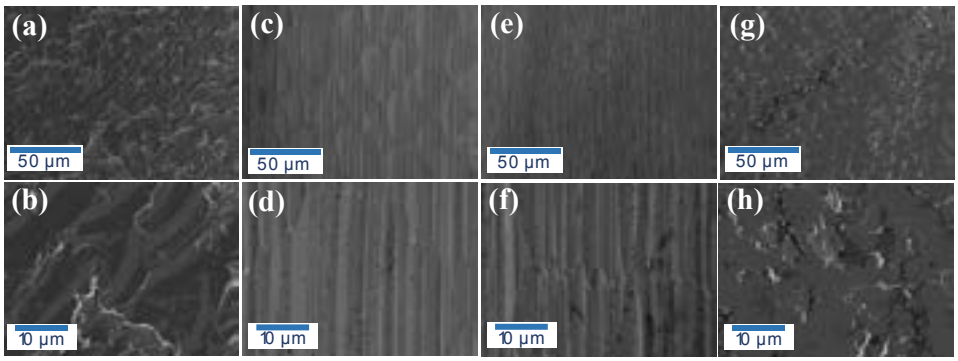


Figura 3 – Topografia usinada para Vc = 170 m/min. Fz = 0,08 mm/dente nas regiões plana (a) e (b); ângulo (c) e (d); ângulo punção (e) e (f) e centro (g) e (h).

Além de uma superfície com rugosidade levemente inferior e menor quantidade de defeitos o aumento de 50 % da velocidade de corte (85 - 170 m/min.) permitiu reduzir o tempo da etapa de acabamento em 50 %, sendo de 40 para 20 minutos. A tecnologia *high speed milling* permitiu acrescer a qualidade superficial e melhorar significativamente a produtividade.

CONCLUSÕES

- A tecnologia *high speed milling* promove melhora da rugosidade e melhor homogeneidade da topografia da matriz.
- O aumento da velocidade de corte permite reduzir o tempo de processo no acabamento em 50 % e ainda melhorar a qualidade superficial.
- Os defeitos superficiais devido a região de contato da ferramenta com a superfície da peça em regiões planas não foram sanados com o high speed milling. Esse resultado está relacionado a natureza da ferramenta e das máquinas CNC's de três eixos.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido com apoio da FUNDEP e está inserido Projeto Mover: Projeto e Fabricação de Matrizes de Forjamento Integrados à Engenharia de Superfícies. Felipe Canal agradece à CAPES (Processo n° 88887.988547/2024-00). João Vitor Piovesan Dalla Nora agradece ao CNPq (Processo n° 140743/2024-3), Alexandre da Silva Rocha agradece ao CNPq/MCTI 10/2023 (Processo n° 308773/2018-7) e Auxílio à Pesquisa (APQ) processo n° 407742/2023-9

REFERÊNCIAS

[1] DINIZ, A. E.; FERREIRA, J. R.; SILVEIRA, J. F. Toroidal Milling of Hardened SAE H13 Steel. v. XXVI, n. 1.

[2] KECELJ, B. et al. Speciality of HSC in manufacturing of forging dies. Journal of Materials Processing Technology, v. 157–158, p. 536–542, 2004. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.07.112.

[3] LING, C. L. et al. Effect of substrate roughness and PVD deposition temperatures on hardness and wear performance of AlCrN-coated WC-Co. **Surface and Coatings Technology**, v. 436, p. 128304, 4 mar. 2022.

[4] MAGRI, M. L.; DINIZ, A. E.; BUTTON, S. T. Influence of surface topography on the wear of hot forging dies. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 65, n. 1–4, p. 459–471, 2013.

[5] SCHULZ, H. High speed machining. *In*: DASHCHENKO, ANATOLI I. Manufacturing technologies for machines of the future: Springer, 2003. cap. 7, p. 197-214. ISBN 978-3-642-55776-7. *E-book*.

[6] Kumar, H., & Vignesh, S. (n.d.). High-speed machining in milling process-A review. In *International Journal of Advanced Research, Ideas and Innovations in Technology*, 2021.

[7] JAIN, A.; BAJPAI, V. Introduction to high-speed machining (HSM). In: High-Speed Machining. Amsterdam: Elsevier, 2020. p. 1–25.

[8] PASINI, G.; ZEILMANN, R. P. Case study for high speed milling of forging dies cavities.

Cyber Physical Systems applied to induction forge heaters

Sistemas Ciberfísicos aplicados em fornos de aquecimento por indução para forja

Alexander N. Ivanov [1]
Vladimir A. Bukanin [1]
Alexei E. Zenkov [1]
José Carlos Zerbini [2]

ABSTRACT

This publication is related to numerical optimization of induction heaters for forging technologies using new application in ELTA 8.0. Although it is impossible to measure Temperature x Radius profile for each workpiece in a forge line, this parameter can be calculated using special modification of ELTA, installed on embedded industrial PC with temperature measuring subsystem. It is about integration into real time of the simulated thermal process as requested with the high frequency power supply in induction heating system.

A new embedded control system for realization of induction heating technologies with software and hardware is described. The objective of this system is to ensure a continuous monitoring and fixing of all necessary parameters, including the distribution of temperature in the cross-section of the heated load. This smart system of a high frequency power supply consists of a single-board industrial computer with a simulation program of electrothermal analysis, multiple sensors and a visualization unit. A real-time heating process is realized using an embedded computing algorithm of simulation and optimization to select a required power on each heat cycle at a given temperature.

Key words — induction heating, hot forging, ELTA program, smart control system, predicted temperature.

[1] Dr., Saint-Petersburg Electrotechnical University (LETI), Russia; anivanov@etu.ru
[1] Dr., Saint-Petersburg Electrotechnical University (LETI), Russia; VABukanin@etu.ru
[1] Dr., Saint-Petersburg Electrotechnical University (LETI), Russia; aezenkov@etu.ru
[2] Eng., Synergetica Sistemas e Processos, zerbini@synergeticasp.com.br

1. INTRODUCTION

Electrothermal analysis programs ELTA and 2DELTA are successfully used in the design and research of forging heating with a good reliability, confirmed experimentally [1–3]. New opportunities for improving the quality of metal during forge heating can be provided by the use of cyber-physical systems (CPS) [4–7]. As a rule, CPS smart systems are built into the power supplies enclosures. The main task in developing such systems is the selection of calculation algorithms or the creation of the necessary algorithms and corresponding programs for controlling the heating process. The need for fast calculation of electrical and thermal problems is due to the large number of iterations for the real-time process control system. In this regard, the use of known algorithms and programs for electrothermal calculation and control of the heating process is impossible.

A special application in the ELTA program was required to achieve this goal. ELTA 8.0 has additional Applications of Multi-Inductor Continuous Heating and Simultaneous Heating for optimization of technological process. These models can be implemented in an intelligent process control system. For this, the type of induction heating system of the forging line before the press, the frequency and other parameters of the power source are selected. The preliminary simulations make it possible to estimate the selected variant of induction coils and power supplies after several iterations. Usually developers are interested in the possibility to obtain the required uniformity of heating in the cross section of the billet before forging. Since he cannot precisely determine the optimal parameters, the program helps him to complete this design process after a preliminary selected option. The control systems of heating process use the variety of temperature sensors to measure temperature, which transmit the required information in order to adjust parameters of the power supplies. This prevents the use of embedded computing in power supplies to control the heating process in real time, as well as obtaining the necessary parameters, such as the distribution of temperature in the volume of heated workpieces.

2. STRUCTURE AND ALGORITHM OF EMBEDDED CONTROL SYSTEM

Special application of the ELTA program has been developed specifically to solve simulation problems exceptionally quickly, allowing it to be integrated into the real-time system process [2-4]. The optimization algorithm selects the required power on each heating stage at a set temperature, which is controlled by the sensor.

This system consists of a high frequency (HF) power supply, a matching circuit, the induction coil with the workpiece to be heated, the temperature sensors and a coupling device with embedded computing of electrical and thermal parameters. A possible variant of the induction system is shown in Figure 1.

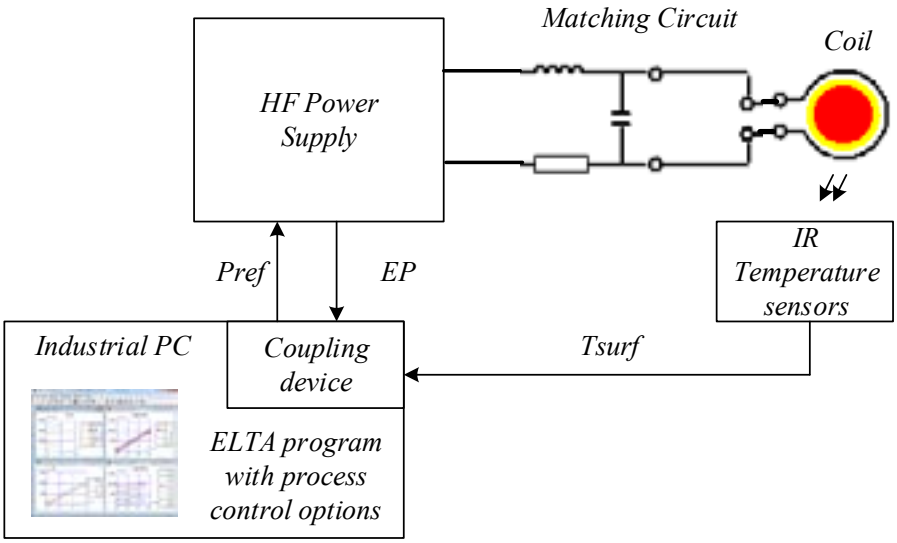


Figure 1. (#7) Structure of CPS smart induction system

Electric parameters (EP) of the HF power supply and the induction coil (voltage, current, frequency) are measured and indicated on display of panel board as well as heating time and surface

temperature T_{surf} of heating part, determined by an infrared (IR) thermo-view imager. Algorithm of electrothermal calculation is described in [2]. Algorithmic diagram of optimization is shown in Figure 2. Operator sets the required temperature on the surface T_{set} and the initial value of the power source S_0. Then ELTA calculates the surface temperature T_{cur}. Expected surface temperature T_{cur} is compared with required temperature range T±ε, where ε – allowed temperature tolerance. If T_{cur} is more than T+ε, the output parameter S decreases and the calculation continues. If T_{cur} is less than T-ε, ELTA will calculate with the increased value of output parameter S. If T_{cur} is inside the temperature range T±ε, solution is found.

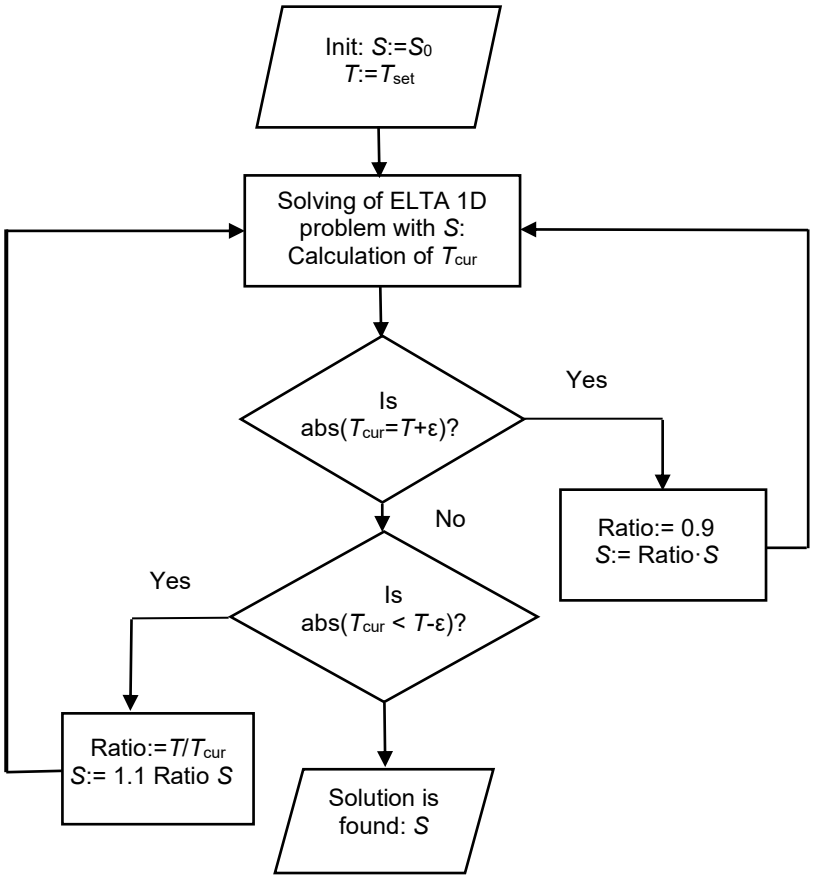


Figure 2. Diagram of the single-objective optimization in ELTA

The power change parameter ±10 % S=(0.9 or 1.1)S or the choice of another value is determined by the minimum convergence time of the iterative calculation process. The next heating stage for another set of inductors is calculated similarly.

3. POSSIBLE REALIZATION OF SMART CONTROL SYSTEM

The induction installation is a quite complex technical system. The continuous forging heating line can contain dozens of induction coils and several power sources. In this case, the controlling system can be included in each power source, as well as be a separate common system. The main option is to embedding the microsystem in every power supply. In this case, the computer can also be used to control some of the internal processes of the power supply itself.

The simultaneous heating process of the workpieces is less complex for the implementation of the control and monitoring process compared to a continuous or semi-continuous process. However, there are some difficulties with this type of heater. If the entire process and calculation of the temperature distribution in the volume of workpieces requires a continuous control, the computer of one power source can be basic, and the other can be additional.

Deploying of simulation programs designed for x86-64 platforms in industrial workstations with real-time process support is one of main problems of embedded CPS. Another problem is choosing the type of computer and the configuration of the control system. There are several ways to deploy CPS using modern HF power supplies. Typically, power supply converts 3-phase electrical energy of line frequency into single-phase power of high or medium frequency. Its structure for induction heating application is shown in Figure 3. Power supplying circuitry delivers the electrical power from the HF

converter to the coil and depends on compensation circuits (parallel, series, series-parallel, etc.) and required voltage transformation (HF matching transformer). Information to the compact programmable logical controller (PLC) of general purpose comes from the control panel, a remote control and monitoring unit, an output current sensor, temperature sensors and sensors of water-cooling system as feedback signals. A special firmware of microcontroller (MCU) regulates parameters of power supply and process using information from current and voltage sensors of converter, PLC and the remote unit. In addition, the control system protects the HF convertor from electric faults, overheating, and so on.

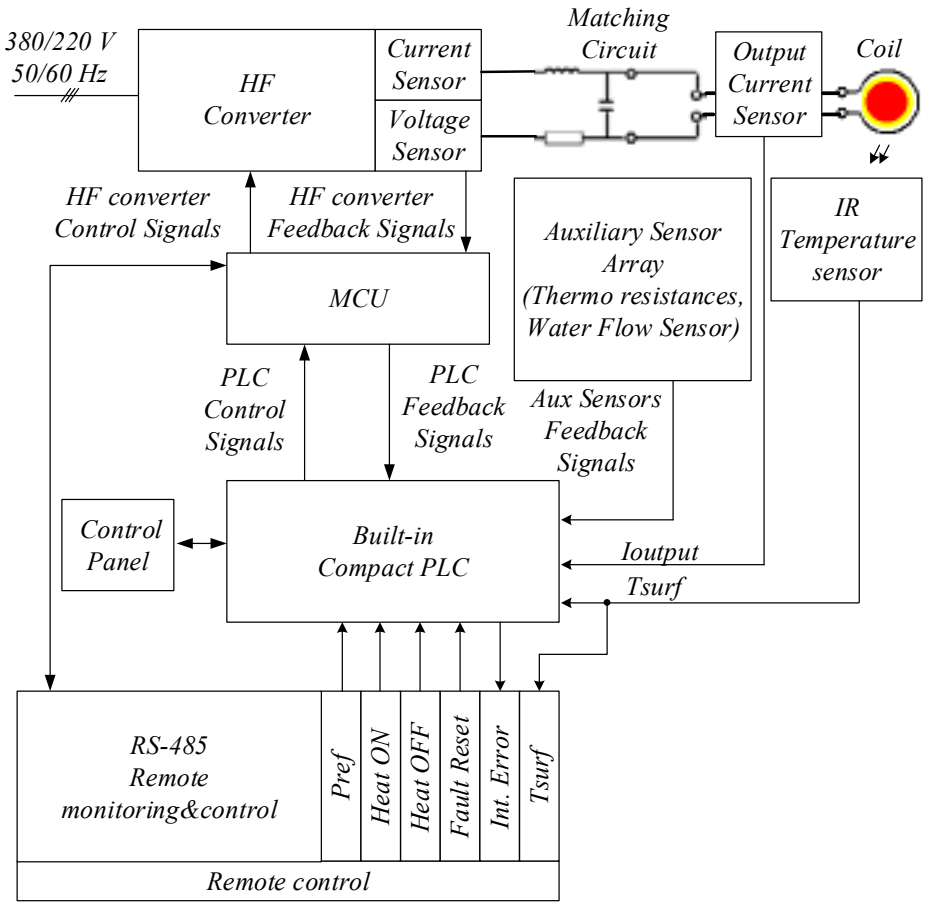


Figure 3. Structure of a CPS smart power supply

In the basic mode of operation, heating process is controlled from the built-in *Control Panel*. However, in the more complicated cases the HF power supply can be integrated in the control system of the superior level (level of production line, level of manufacturing machine). Several *Remote Control* signals, such as reference level of power, switch off or switch on of heating, fault of systems, etc., are used for this purpose. Exchange of required information and communication between different devices is carried out by the RS-485 interface. Reference value of output power P_{ref} can be set from external source by standard analogue signal (0…10 V or 4…20 mA). Three dry contact signals "*Heat ON", "Heat OFF", "Fault Reset"* may be used for purposes of the remote control. Internal error "*Int. Error*" dry contact signal informs the remote control system about fault of the HF power supply. Output analogue signal T_{surf} allows to build external temperature control loop. Type of T_{surf} signal depends on the characteristic of the *IR Temperature sensor*. Described system allows controlling the semi-automated heat process. In the case of changing technological requirements or in the case of external perturbations somebody may change the HF power supply mode and/or fix the problem manually.

Improving the control system especially with multiple inductors and power supplies is possible based on modular PLC (Figure 4). This modular PLC includes central processing unit (CPU) and several additional units. *Ethernet communication unit* allows to set at the information level exchange of technological data (*receipt* and *temperature logs*) between the control system and subject-oriented software (ELTA). *Analogue output unit* defines reference value of the output power P_{refi} for each HF power supply (from *1* to *N*) according to an electronic current *recipe*. The *Temperature sensor unit* passes current value of temperature from each *IR Temperature sensor.* These signals are the

feedback signals for temperature control loops. In addition, values of temperature have to be storaged at the data memory of PLC. These data may be shared to the *Temperature log* of whole process. The *Digital I/O unit* allows controlling each HF power supply by digital signals, presented at Figure 3, section “Remote control”.

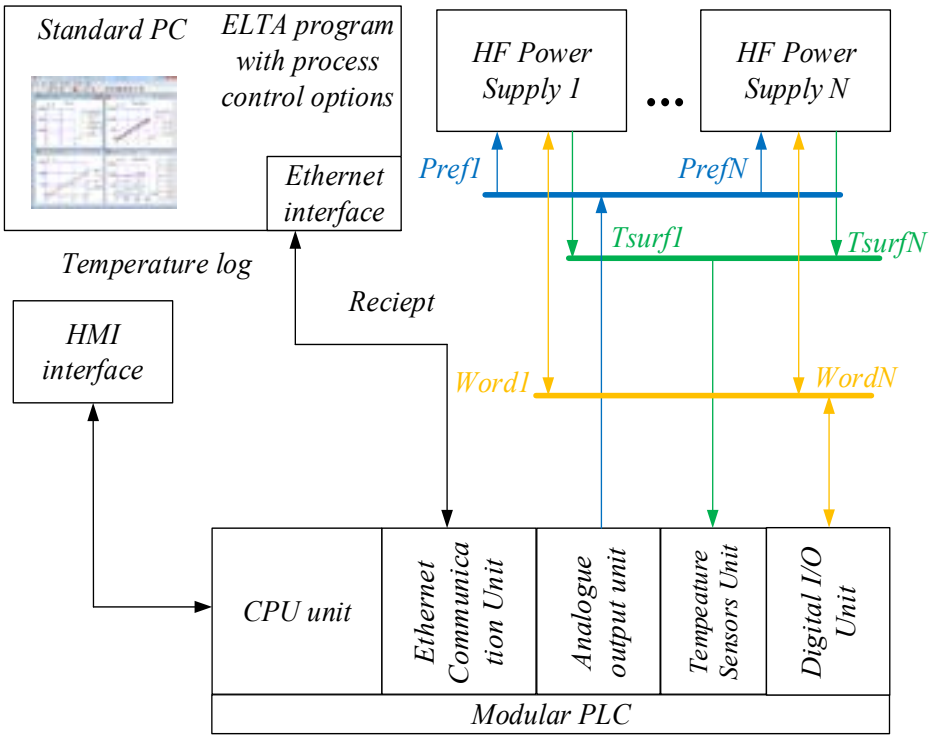


Figure 4. Control system for several HF power supplies built on PLC

The system, presented in Figure 4 allows applying wide range of control techniques. However, from the economical point of view the *Modular PLC* components are rather expensive and may be used for the application with huge energy consumption and high productivity. Using of single-board embedded computer built on ARM (Advanced Reduced Instruction Set Computer Machine) architecture can significantly reduce cost of the control system. In this case, each or only one selected as *master* HF power supply can be equipped with embedded computer.

ICO100-839-N3350-2COM-DIO-DC embedded system with Intel® Celeron® N3350, 1.1 GHz 1.1 is one of the most interesting variants that can be completely suitable for solving the problem of optimization and control of the induction heating process. The I/O interfaces include two RS-232/422/485 ports, two USB 2.0 ports, one Gigabit Ethernet, one VGA and one DIO. Furthermore, the Intel® Apollo Lake-based ICO100-839 is equipped with two PCI Express Mini Card slots, one for mSATA storage card and another for 3G/GPRS/Wi-Fi connections. Windows IoT Enterprise 10 allows installing the ELTA application, performing all heating and controlling settings.

Thus, the industrial PC, embedded into the HF power supply with the ELTA installed,first optimizes the heating process, and subsequently controls and records the results in the protocol for the quality management system. Thus, a *real-time temperature control* system is used. For multi-inductor systems, real-time monitoring and control of output power of all power supplies can mitigate the effect of any possible changes of parameters and disturbances. As previously noted, the heating from each HF power supply can be requested as necessary, which will allow to continue the heating process even when one generator fails.

4. EXAMPLES OF HEATING PROCESSES

Variant A. Continuous forging induction heater (Figure 5).

The induction installation consists of three induction coils, three high-frequency power supplies and controlling system with sensors. Material of workpiece, its initial temperature and external radius may be defined in the “Part” tab. Parameters of coils (turns number, coupling gap, length, tube profile and etc.), inductor cooling parameters (water temperatures, pressure drop limit), parameters of the

matching circuit (type, leads configuration and etc.) may be defined in the “Inductor tab”. “Processing” tab allows to set parameters of heating process type of HF power supply (constant current, constant voltage, constant power), reference value of output parameter (current, voltage or power), frequency and speed of workpiece. Interface of process control functions also presented at the “Processing” tab. It is possible to set precise coordinate of temperature sensor, target temperature and required tolerance for each inductor.

Workpiece parameters: material – carbon steel 0.4 % C, diameter is 60 mm.

Inductors parameters: Three induction coils with length 250 mm, internal diameter is 110 mm, turns number 25. Profile and dimension of copper tube – rectangle 18x8 mm, thickness 2 mm. Thermal insulation: 10 mm.

Processing parameters: scanning speed 1 cm/s, frequency of power sources 1 kHz, 2.5 kHz and 8 kHz for the first, second and third induction coils respectively. Maximal permissible output powers of power supplies are 200, 120 and 50 kW respectively. Temperature sensors are installed at the distances 280, 600 and 950 mm (directly at the output of each inductor). Process control parameters: inductor 1 – Set Value of temperature is 950 °C, inductor 2 – Set Value of temperature is 1200 °C and inductor 3 – Set Value of temperature is 1240 °C.

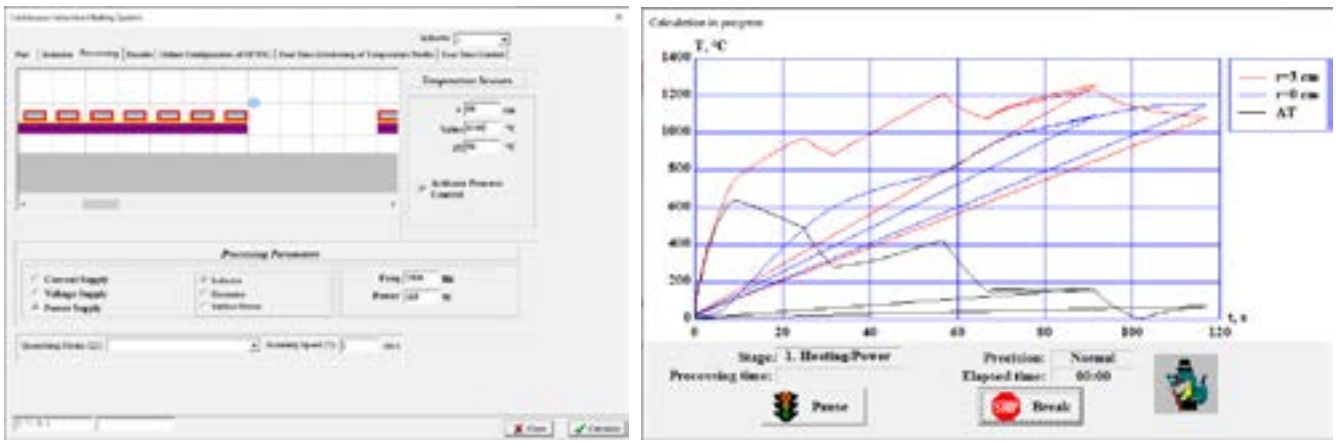


Figure 5. View of system and simulation process

***Results of analysis*:** Results of simulation show that current values of temperature are 974 °C, 1212 °C and 1236 °C if powers of inductors are 180, 100 and 36 kW respectively.

The other windows (online configuration of power source and real-time monitoring of temperature profile) are shown in Figure 6.

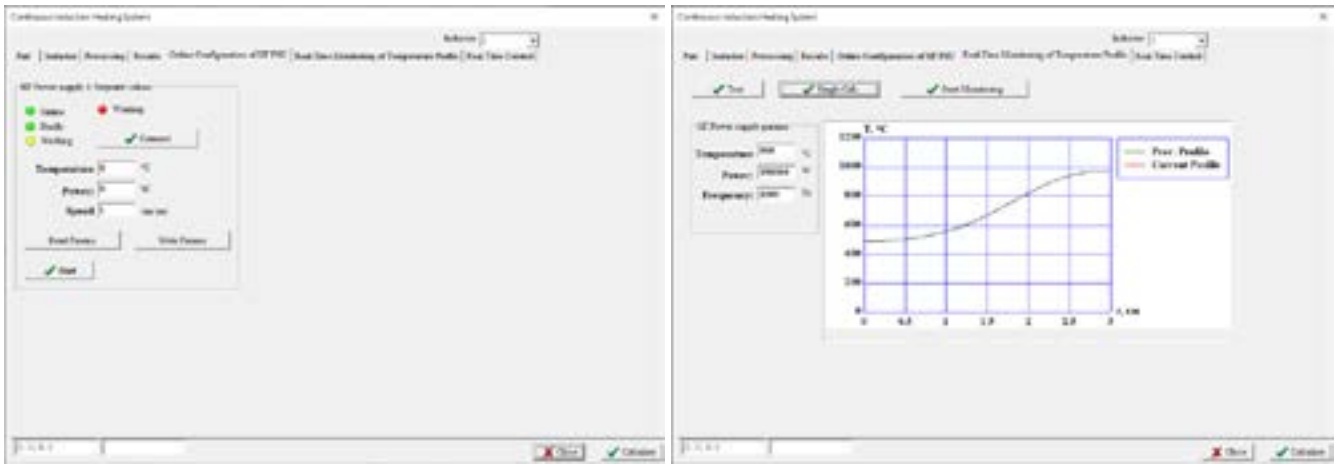


Figure 6. View of monitoring process windows

Variant B. Simultaneous forging induction heater (Figure 7).

Workpiece parameters: material – carbon steel 0.4 % C, diameter is 50 mm, length 474 mm.

Inductor parameters: length is 113 mm; internal diameter is 92 mm, turns number 11. Profile and dimension of copper tube – rectangle 7x7 mm, thickness 2 mm. Thermal insulation: 7 mm.

Processing parameters: time of heating 120 s, single frequency of power source 1 kHz, output power 30 kW. Process control parameters: Set Value is 1200 °C. Target parameters: temperature difference dt = 70 °C, tolerance is 5 °C.

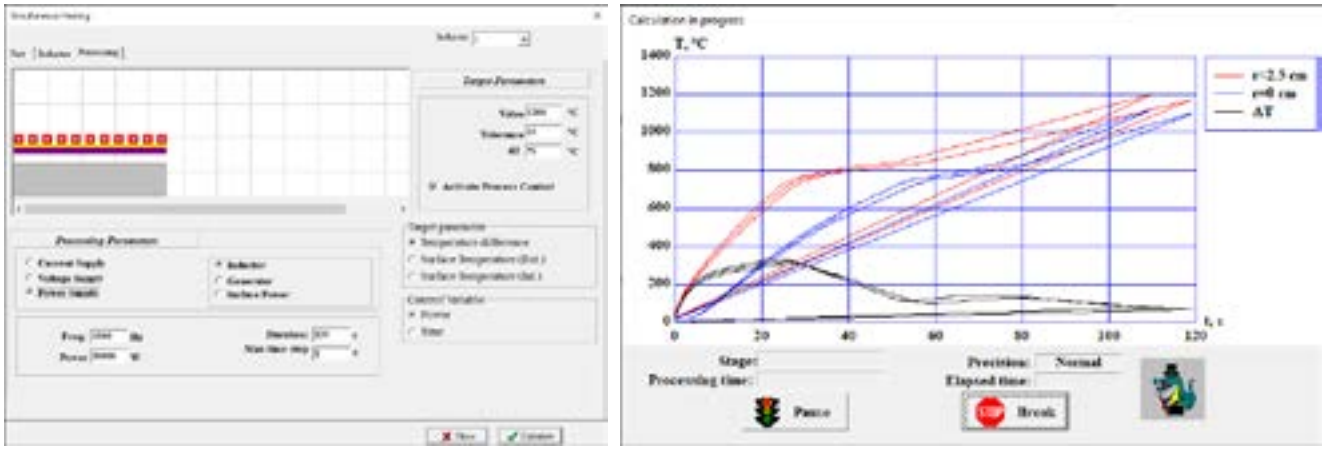


Figure 7. View of system and simulation process

***Results of analysis*:** Results of simulation show that current value of temperature is 1136 °C. Power of induction coil is 27.8 kW.

5. DESCRIPTION OF THE PROTOTYPE

Prototype of the cyber physical induction system was designed and realized using high frequency power supply of small power. Prototype includes high-frequency power supply VGT7-10/66 @10kW 66 kHz (A2), the matching circuit block with the cylindrical coil (A4), the input block (A1) and the control block (A3). Structure diagram of the prototype is presented in the Figure 8. View of the prototype is presented in the Figure 9. The input block (A1) allows to connect prototype to 380/220 V 50 Hz power supply. This block includes RCCB device for electrical safety and fire safety issues, the multi-instrument measuring unit MUC-4224 for measuring of input power and other electrical parameters and necessary auxiliary parts. The high-frequency power supply VGT7-10/66 (A2) is standard high frequency power supply for induction heating applications based on three-phase diode rectifier and single-phase full-bridge IGBT-inverter with PWM-control. This block may controlled remotely using 24 V DC discrete input and output signals and input analog signal «Power level». The control block (A3) allows to calculate electrothermal problem in the real-time mode and realize common functions of control and visualization. The matching circuit block with the cylindrical coil (A4) is a load of HF-power supply (A2). This block includes series matching circuit with transformer (ratio is 6). It is possible to use metal cylinder as the load or test steel cylinder with the thermocouples and known material properties for calibration goals.

The control part (A3) includes compact programmable logic controller (PLC) Omron CP1H-XA40DT-D. This PLC realizes control program of prototype. Analog inputs of PLC are connected to pyrometers for temperature control of the workpiece surface during experiment. PLC controls the HF power supply (A2) using discrete and analog signals (see Figure 10). Also PLC receives temperatures form thermocouples input unit during calibration via Modbus RTU protocol (XS3, RS-485 interface). Embedded computer ICO100 is used as a platform for the ELTA program with control options and several service software (CX-Programmer from Omron, Easy Builder from Weintek).

The operator panel Weintek MT8071iE is a main human-machine interface of the prototype. Panel visualizes current state of the installation and gives us current temperature profile as a 2D-graphics “Temperature vs. Radius” and “Temperature vs Time” in the real-time. Physical buttons ”Run” and “Stop” and lamps “Heating” and “Fault” also are used for visualization and control.

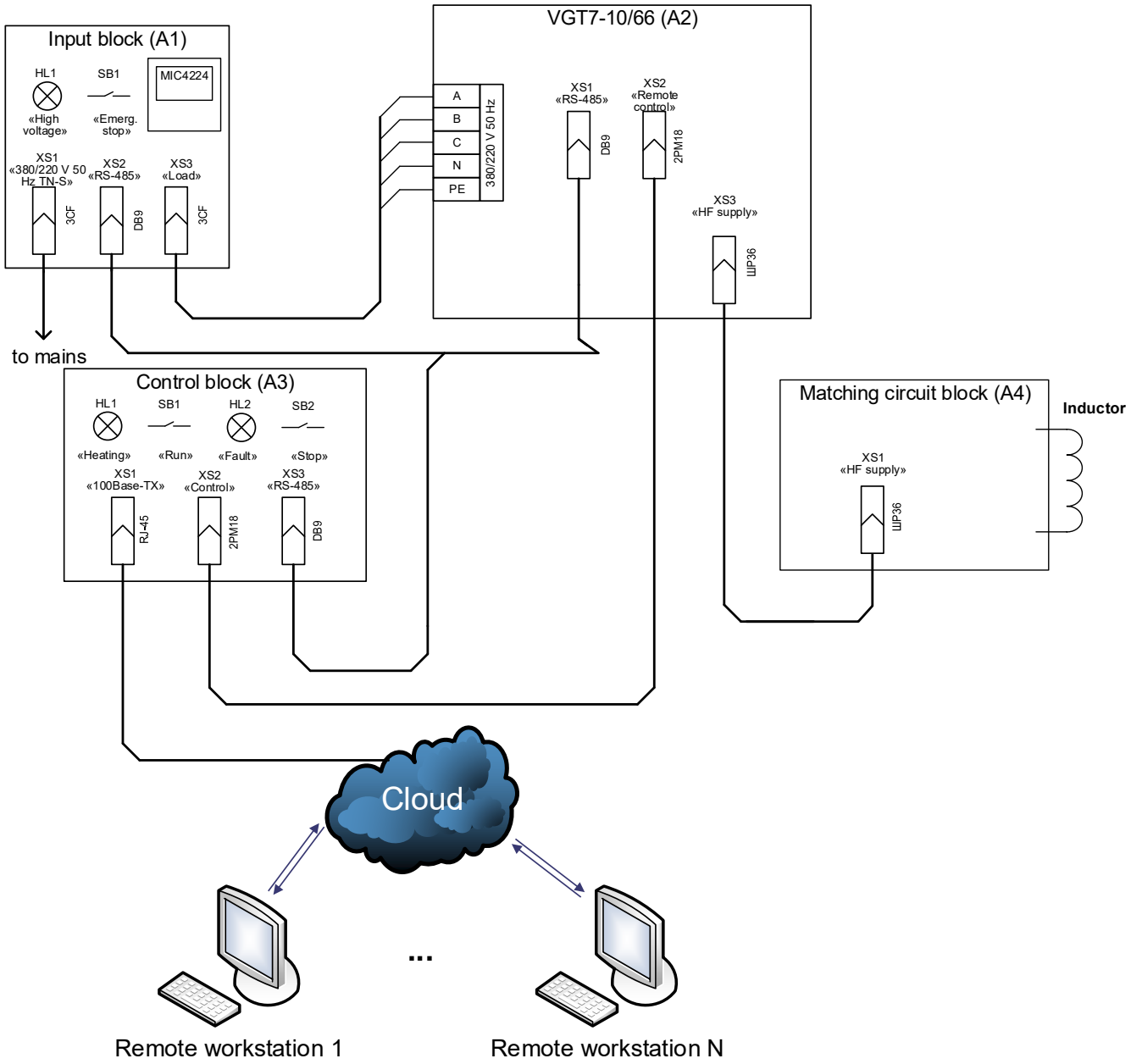


Figure 8. Structure diagram of the prototype

Required mode of heating is set using the operator panel. This data transfers to the embedded computer (ELTA software) using ModbusRTU protocol (operator panel is master, XS1; computer is slave, XS3). Operator panel receives current temperature profile as a feedback and visualizes it as 2D-graphics “Temperature vs. Radius” and “Temperature vs Time” in the real-time. Then the embedded computer (ELTA software) must transmit control commands and feedback signals to PLC using ModbusRTU protocol (computer is master, XS2; PLC is slave, XS2). Computer (ELTA software) receives current temperatures from pyrometers or thermocouples (depends on mode of operation) and the HF power supply state as a feedback. The current temperature profile is then calculated on the computer using the ELTA software. The calculated temperature profile is stored on the computer's hard disk and transmitted to the operator panel via the described channel.

USB interface of the PLC (XS1 on PLC) allows to connect PC (XS1 on PC) for service purposes: loading of PLC program, online debug and monitoring using Omron CX-Programmer software. Ethernet interface of computer allows connecting prototype to Ethernet network and using standard software and protocols for remote data exchange (Microsoft remote desktop for example).

Figure 9. General view of the prototype

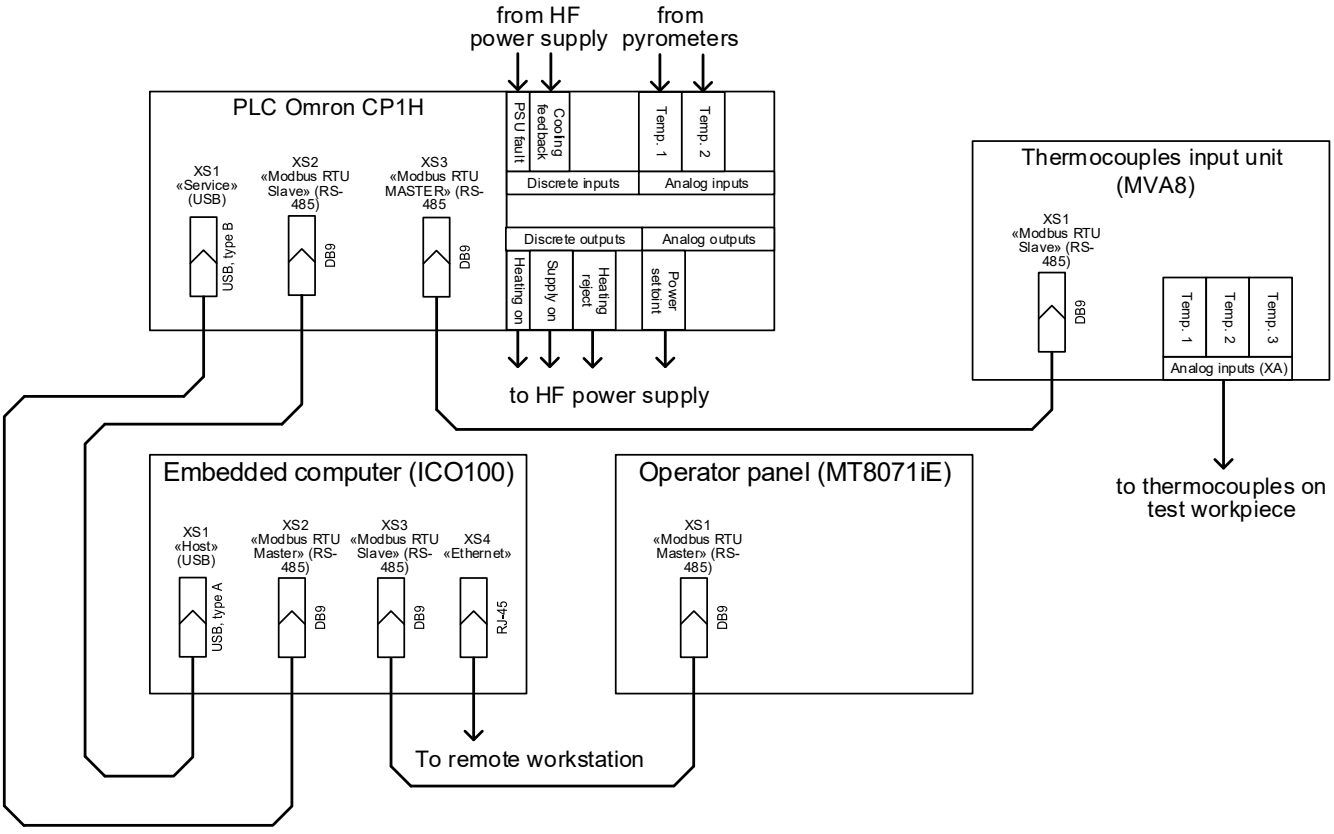


Figure 10. Structure diagram of the control block (A3)

6. CONCLUSIONS

Special applications and modification of ELTA 8 installed on embedded industrial PC with a temperature measuring subsystem help to address and solve product quality problems in the induction heating forging line. The embedded industrial computer with the ELTA program allows the operator to easily set-up this system to implement technology automatically without further human involvement. The possibilities to record heating results are significantly increased due to the use of simulation results, which allows expanding the fixed parameters that were previously not available for measuring sensors.

Tests of the designed prototypes shows good convergence between measurements of surface temperatures and calculations of temperature profile. Calculation of the power consumption also rather close to the experimental measurements. It is necessary to continue this research by embedding this prototype into real forging process.

7. REFERENCES

[1] José Carlos Zerbini, Alexander Ivanov, Vladimir Bukanin, Ademir Angelo de Vasconcelos. Use of the ELTA software for study of electromagnetic and thermal processes in induction heating steel forging lines. 35th SENAFOR 19th International Forging Conference. October 7-9, 2015, Porto Alegre, Brazil. P. 1-15.

[2] Valentin S. Nemkov, Vladimir A. Bukanin, Alexander N. Ivanov, José Carlos Zerbini. Perspective of using electrothermal software programs in investigation of forge heating by induction. 36th SENAFOR 20th International Forging Conference. October 5-7, 2016, Porto Alegre, Brazil. P. 1-12.

[3] Ivanov A.N., Bukanin V.A., Zerbini J. C. Electrothermal analysis for effectiveness of induction forge heating. Proceeding of the 21th International Forging Conference (37th SENAFOR). October 4-6, 2017, Porto Alegre, Brazil. P. 11-17.

[4] Oscar Lucía, Pascal Maussion, Enrique J. Dede, and José M. Burdío, Induction heating technology and its applications: past developments, current technology, and future challenges. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 61, No. 5, May 2014. pp. 2509-2520.

[5] V. Bukanin, V. Vologdin, Vl. Vologdin Jr., A. Blagirev, A. Homutinnikov, A. Ivanov and A. Zenkov, Control system of smart HF power supply integrated with ELTA program, in Proc. of the International Conference on Heating by Electromagnetic Sources HES-19, Padua, 2019, pp. 73-78.

[6] A. Ivanov, V. Bukanin, A. Zenkov, V. Vologdin and Vl. Vologdin. Cyber Physical Systems Integration for Induction Heating Technologies, Proc. of the 9th Mediterranean conference on embedded computing (MECO), 8-11 JUNE 2020, Budva, Montenegro. P. 825–828.

[7] A. Ivanov, V. Bukanin, A. Zenkov, V. Vologdin and Vl. Vologdin. A New Approach to Control of Induction Heating. Proc. of the XIX International UIE Congress on Electrotechnologies for Material Processing in Pilsen (Czech Republic), 1–3 September 2021. Evolution and new trends in electrothermal processes. P. 22-23.

44º SENAFOR

28ª Conferência Internacional de Forjamento - Brasil
14ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas / 11º Congresso do BrDDRG
14ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis
3ª Conferência Internacional de Inovação em Materiais e Manufatura
Porto Alegre, RS, dias 1, 2 e 3 de outubro de 2025
www.senafor.com

Mechanisms for Controlling Austenitic Grain Size in Hot-Forged Microalloyed Steels

Leandro Pinheiro Birck (1)
Luciano Volcanoglo Biehl (2)
Jorge Luis Braz Medeiros (2)
(1) Master in Mechanical Engineerig – Universidade Federal do Rio Grande - FURG
(2) Professor Dr. Metallurgical Engineer – Universidade Federal do Rio Grande - FURG

ABSTRACT

One of the main challenges in the hot forging process is the control of austenitic grain size, which depends not only on the chemical composition of the steel but is also strongly influenced by the time and temperature applied during the process. Some alloying elements have the ability to restrict austenitic grain growth by acting as inhibitors. This work aims to map grain growth in three types of steel: a carbon steel, a low-alloy steel, and a microalloyed steel, all forged at a temperature of 1200 °C. Subsequently, the austenitic grain sizes were evaluated using optical microscopy. The microstructures observed in the samples of SAE 1020, SAE 8620, and ASTM A131 AH36 steels consisted of ferrite and pearlite. ASTM A131 AH36 steel exhibited the most refined grain size due to the presence of microalloying elements. SAE 8620 steel showed finer grains compared to SAE 1020, influenced by residual elements in its composition. The HV1 microhardness values were consistent with the presence and nature of the alloying elements in each steel. The grain size analysis revealed that ASTM A131 AH36 steel performed well even after undergoing a severe carburizing treatment. On the other hand, SAE 8620 and SAE 1020 steels were not able to maintain an adequate austenitic grain size. It is therefore concluded that ASTM A131 AH36 steel demonstrated better microstructural stability after the forging process at 1200 °C followed by controlled cooling. In contrast, SAE 8620 and SAE 1020 steels exhibited abnormal grain growth, requiring the application of a normalization heat treatment to homogenize the austenitic grain size.

Key words — Forging; Austenitic Grain Size; SAE 1020 Steel; SAE 8620 Steel; ASTM A131 AH36 Steel.

1. INTRODUCTION

The industry increasingly seeks efficiency, cost reduction, and productivity. One of the most important and widely used raw materials is steel and its alloys; therefore, the techniques for their production and processing require growing attention.

One of the primary methods of supplying this raw material is hot forging. In this work, the effect of temperature on abnormal austenitic grain growth was analyzed by comparing a low-carbon steel, a low-alloy steel, and a microalloyed steel. The study and development of these steels are of great industrial importance. Although new materials, such as polymers and composites, are being improved in manufacturing processes, steel still holds high economic and technological potential [1]. Hot forging is a mechanical forming process with high productive impact and can be performed using friction presses and drop hammers. Aspects related to pyrometry and heating methods have evolved significantly, transitioning from resistive to induction heating [2]. This change has contributed to lower scrap rates due to reduced surface scale formation and better grain size control through stricter temperature regulation. Additionally, controlled cooling using insulators and fans has made it possible to optimize the microstructure of steels with different chemical compositions at the end of the forging process, enabling subsequent machining techniques without the need for post-forging heat treatments such as normalization or annealing [3]. When forging is carried out at high temperatures, one of the main concerns is austenitic grain growth. This type of grain growth can be either normal or abnormal. Both conditions can be critical for steel, potentially reducing fatigue life in manufactured components and promoting the presence of cracks and anisotropies [4].

Microalloying elements can be added to steel to pin the austenitic grain size. The main elements used are V, Nb, and Ti, with Al and N also standing out due to their role in forming nitrides and carbonitrides through precipitation [5]. Microalloying elements can be added to the chemical composition of carbon steels, such as ASTM A131 AH36, or to low- and high-alloy steels, offering a wide range of potential applications [5, 6]. The main objective of this study is to map the behavior of austenitic grains in hot-forged low-carbon, low-alloy, and microalloyed steels at a temperature of 1200 °C, and to analyze the microstructural evolution and microhardness behavior of the samples.This document is a template for Microsoft Word. If you would prefer to use another text processor, use this document as an instruction set.

2. METHODOLOGY

For the hot forging tests, the steel samples of SAE 1020, SAE 8620, and ASTM A131 AH36 were prepared as shown in Figure 1. The SAE 1020 and SAE 8620 steel samples were forged using cylindrical blanks, as was the ASTM A131 AH36 steel.

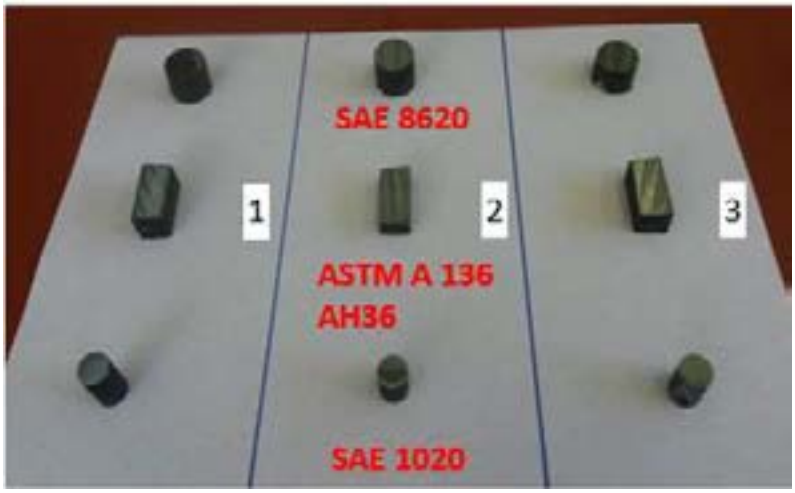


Figure 1: Cylindrical blanks prepared for hot forging tests using SAE 1020, SAE 8620, and ASTM A131 AH36 steels. All samples were machined to similar dimensions to ensure consistent forging conditions.

Initially, the chemical composition of the samples was analyzed using an optical emission spectrometer, model Foundry-Master Pro, by Oxford Instruments. Subsequently, the steel samples were heated in a resistive furnace (model 3000, EDG brand) for 60 minutes at a temperature of 1200 °C and then forged into their initial preform shape. After forging, the samples were cooled by forced air on a custom-built conveyor system. The characterization of the materials after cooling was performed using optical microscopy and microhardness testing. For these procedures, the samples were sectioned axially, with the cutting plane passing through the center of the cylindrical specimens. The specimens were then ground using a sequence of abrasive papers with grits of 120, 240, 320, 400, 500, 600, and 1200 grains/cm². Polishing was carried out using a circular polisher with aluminum oxide abrasive. In the final preparation step, the surface of the steel samples was etched using picric acid with a surfactant (to reveal the austenitic grain size) and 2% Nital (for microstructure observation). The objective of the optical microscopy was to evaluate and quantify the microstructures formed during hot forging, allowing comparisons based on cooling rates. This analysis was performed using an Olympus GX 51S reflected light optical microscope. Images were obtained from two distinct regions on the cross-sectional faces: near the surface and at the core of the samples.The microstructures were identified by comparison with reference standards established by the American Society for Metals (ASM), which describe the typical features of each steel phase based on its cooling conditions. Microhardness testing was conducted using a Shimadzu HMV 2 T microhardness tester. For each sample, eight measurements were taken along the radial direction, with points spaced 1.8 mm apart. The first measurement was positioned 0.1 mm from the surface, and the last one at 12.7 mm, corresponding to the center of the specimen. Each indentation was made with a load of 0.3 N applied for 10 seconds.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1 CHEMICAL ANALYSIS

Table 1 shows the chemical compositions of the materials under study. The presence of microalloying elements Nb and V was confirmed in the ASTM A131 AH36 samples. The SAE 1020 and SAE 8620 steels contained residual elements from scrap used during the steelmaking process. These residual elements contribute to an increased phase transformation kinetics [4, 6]. Additionally, the presence of nitrogen (N) and aluminum (Al) promotes the formation of nitrides and carbonitrides along grain boundaries, which anchors the austenitic grain size in the microalloyed ASTM A131 AH36 steel.

Table 1 – Chemical composition (wt%) of the studied steels.

Samples	%C	%Si	Mn%	%P	%S	%Al	%Ti	%Cu	%Cr	%Ni	%Mo	%Nb	%V
SAE 1020	0,22	-	0,4	0,02	0,02	-	-	0,1	0,05	0,04	0.02	-	-
SAE 8620	0,23	0,25	0,8	0,02	0,015	-	-	0,1	0,5	0,4	0,17	-	-
ASTM AH36	0,10	0,25	0,9	0,03	0,03	0,001	0,1	-	-	-	-	0,02	0,05

3.2 AUSTENITIC GRAIN SIZE

Figure 2 shows the austenitic grain sizes of the steels studied, observed prior to forging in the as-rolled condition. For SAE 1020 steel, Figure 2(a) shows a grain size between ASTM E112 grades 6 and 7. In SAE 8620 steel, Figure 2(b) indicates a grain size ranging from ASTM E112 grades 7 to 8. Meanwhile, the microalloyed ASTM A131 AH36 steel exhibited extra-fine grain sizes, classified between ASTM E112 grades 9 and 14.

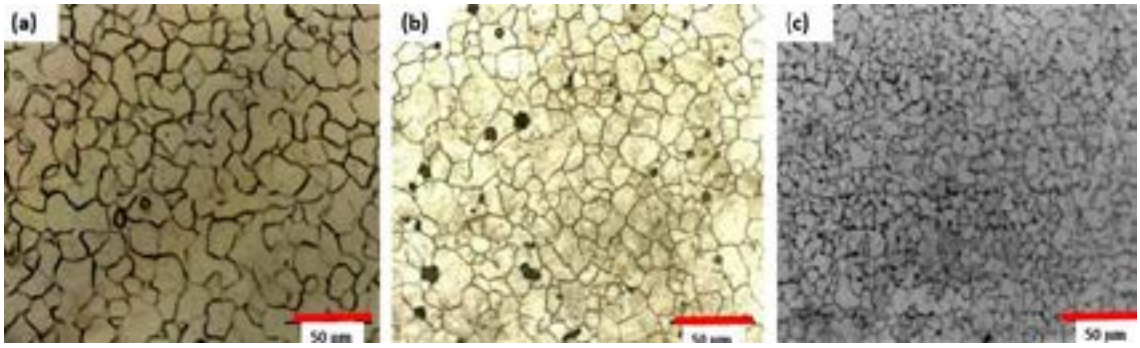


Figure 2: Austenitic grain size of the blanks in the as-rolled condition prior to hot forging.

After the hot forging step at 1200 °C, an increase in austenitic grain size was observed for SAE 1020 steel, reaching ASTM E112 grades 4 to 5; for SAE 8620 steel, the grain size increased to grades 4 to 6; meanwhile, the microalloyed ASTM A131 AH36 steel maintained an extra-fine grain size despite some abnormal grain growth up to grade 8 ASTM E112 (fine grain), as shown in Figures 3(a), 3(b), and 3(c), respectively. Particles precipitate in the austenite after hot deformation, such as controlled forging, as the temperature decreases [6]. These precipitations are deformation-induced and can retard austenite recrystallization. Grain refinement in microalloyed steels mainly occurs due to this group of particles [4, 6]. Finally, there are particles that form during or after the phase transformation from austenite to ferrite, nucleating at the austenite/ferrite interface and within the ferrite [6]. Dispersion strengthening in ferrite typically occurs through these mechanisms, and a fine dispersion of precipitates is generally observed. Transition metal carbides and nitrides precipitate in microalloyed steels [6]. Homogeneous precipitation occurs in deformation fields, forming semi-coherent and incoherent precipitates; interfacial precipitation; heterogeneous precipitation at grain boundaries and dislocations—this last often referred to as strain-induced precipitation (SIP). A pre-precipitate clustering of atoms, nanoprecipitates known as Guinier–Preston (GP) zones in non-ferrous alloys, and also described as "clusters" in microalloyed steels, has received increasing attention over the past decade due to advancements in atom probe tomography [6].

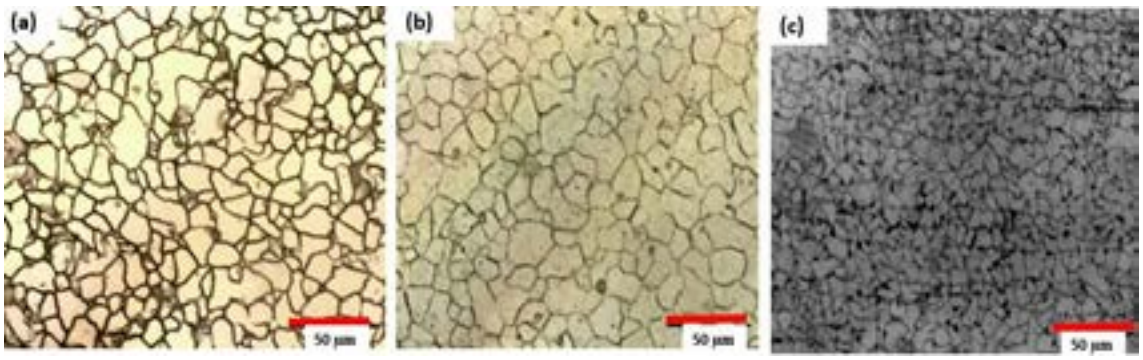


Figure 3: Austenitic grain size of the blanks after heating at 1200 °C and hot forging in steels SAE 1020 (a), SAE 8620 (b), and ASTM AH36 (c).

3.3 MICROSTRUCTURAL ANALYSIS

Figure 4 shows the microstructures of the analyzed steels. In (a), the SAE 1020 steel is composed of ferrite and pearlite; in (b), the SAE 8620 steel presents a microstructure of ferrite, pearlite, and bainite; and in (c), the ASTM A131 AH36 steel also shows a mixture of ferrite, pearlite, and bainite.

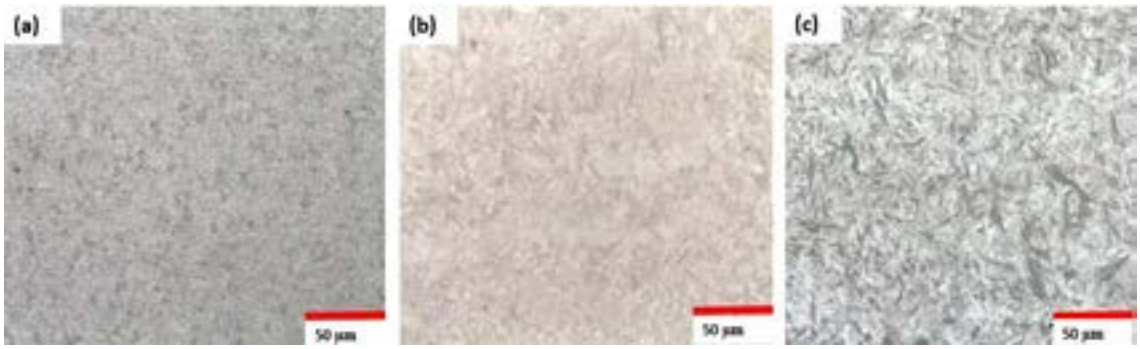


Figure 4: Microstructures of the steels after hot forging: (a) SAE 1020 – ferrite and pearlite; (b) SAE 8620 – ferrite, pearlite, and bainite; (c) ASTM A131 AH36 – ferrite, pearlite, and bainite.

3.4 MICROHARDNESS BEHAVIOR

The microhardness values measured in the substrates of the samples were consistent with the chemical composition balance observed in the analysis. The alloying elements and residuals from scrap favored a shift of the TTT diagram to the right, promoting the formation of bainite and low-carbon martensite [1-6]. Figure 5 presents the microhardness values of the samples after controlled cooling on a conveyor belt with forced air. In microalloyed steels, the most significant precipitates are carbides and nitrides of transition metals such as niobium, titanium, and vanadium, and to a lesser extent, zirconium. These often appear as carbonitrides. In other cases, titanium oxides, sulfides, and aluminum nitrides are also important precipitates.For example, the main expected precipitates include NbC, V(C,N), and TiN. NbC precipitates are commonly expected to form at austenitizing temperatures in most heat treatment applications. Solute niobium remaining in solution in the austenite can also contribute to the subsequent formation of nanoprecipitates, clusters, or fine dispersion-strengthening precipitates in ferrite [1-6].As described below, vanadium has significantly higher solubility in austenite than niobium or titanium, and carbonitrides tend to form only at lower austenitic temperatures in alloys with relatively high levels of vanadium, carbon, and/or nitrogen. Therefore, austenite grain refinement is less likely in leaner alloys, but vanadium tends to precipitate in ferrite across a wide range of steel compositions, covering broad carbon concentrations and processing temperatures. TiN, being highly stable, generally precipitates at high temperatures during the austenitic phase and can help resist subsequent austenitic grain coarsening, even when added in small amounts [1-6].

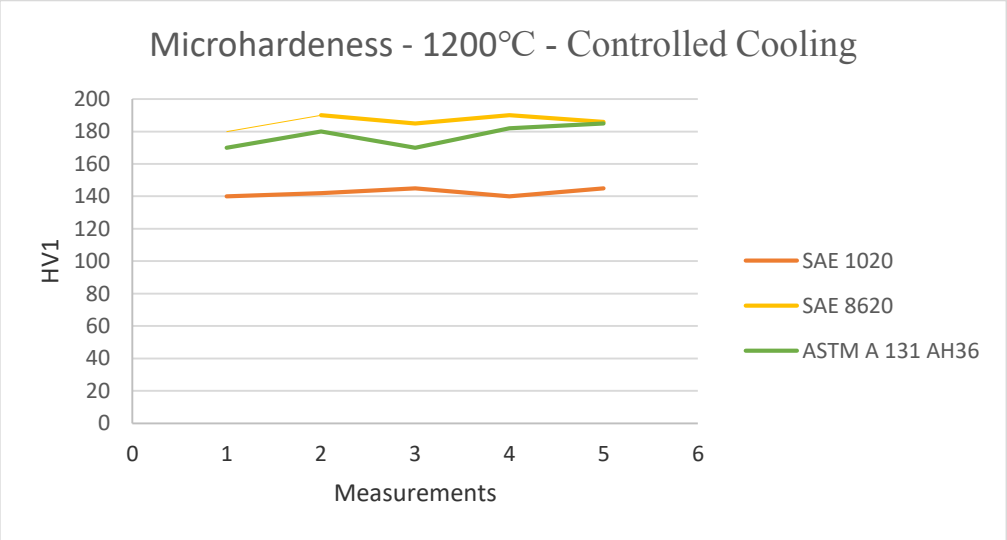


Figure 5: Radial microhardness profiles of the samples after austenitization at 1200 °C and controlled cooling in forced air.

4. FINAL CONSIDERATIONS

Based on the results obtained in this study, the following conclusions can be drawn:

- The AH36 microalloyed steel samples forged at 1200 °C exhibited effective pinning of austenitic grain growth, maintaining grain sizes within ASTM grain size number 5 or finer.
- In contrast, the SAE 1020 and SAE 8620 steel samples showed abnormal grain growth under the same forging conditions.
- The resulting microstructures and microhardness values were directly influenced by the cooling rates applied after hot deformation.
- The thermal cycles must be carefully controlled and aligned with the parameters required for subsequent machining operations, particularly for microalloyed steels.
- This class of steel shows promising potential for high-temperature carburizing processes, where increased carbon diffusion kinetics are beneficial.
- Strict control of austenitizing temperatures during forging is essential to preserve the microstructural integrity of microalloyed steels.
- Induction heating of the blanks proved to be a more efficient method, contributing to better process control and improved performance of this steel class.

5. REFERENCES

[1] Jahazi, M.; Eghbali , B. “The influence of hot forging conditions on the microstructure and mechanical properties of two microalloyed steels”, Journal of Materials Processing Technology”, 2001.
[2] Matlock, D.K.; Krauss, G.; Speer, J.G. **“**Microstructures and properties of direct-cooled microalloy forging steels”, 2001.
[3] Wang J.; Chen, J.; Zhao, Z; Ruan, X**. “**Modeling of microstructural evolution in microalloyed steel during hot forging process”, Acta Metallurgica Sinica, 2006.
[4] Kaynar, A.; Gündüz**,** S.**;** Türkmen, “Investigation on the behaviour of medium carbon and vanadium microalloyed steels by hot forging test”, Materials & Design, 2013.
[5] Zhao, F.; Hu, H.; Liu, X.; Zhang, Z.; Xie, J. **“**Effect of billet microstructure and deformation on austenite grain growth in forging heating of a medium-carbon microalloyed steel”, Journal of Alloys and Compounds, 2021.
[6]Baker, T.N. “Microalloyed steels” Ironmaking & Steelmaking, 2016.

44º SENAFOR
28ª Conferência Internacional de Forjamento - Brasil
14ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas / 11º Congresso do BrDDRG
14ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis
3ª Conferência Internacional de Inovação em Materiais e Manufatura
Porto Alegre, RS, dias 1, 2 e 3 de outubro de 2025
www.senafor.com

Effect of Die Temperature and Speed on Hot Upsetting of AA2024: A Computational Numerical Study

Buglioni Luciano[(1)], Pezzolo Matías[(1)], Sanchez Matías[(2)], Abate Germán[(1,2)], Martinez Krahmer Daniel[(1)]

ABSTRACT

Este trabajo presenta un estudio computacional del proceso de recalcado en caliente de probetas cilíndricas de la aleación AA2024. Se analiza la influencia de tres variables claves; temperatura de precalentamiento de las matrices, velocidad del proceso y software de simulación sobre las fuerzas de conformado. Se realizaron simulaciones bajo tres condiciones térmicas de las matrices: ambiente, precalentamiento intermedio e isotérmica, empleando dos tipos de máquinas que representan distintos regímenes cinemáticos. Las simulaciones se efectuaron con tres herramientas: dos softwares comerciales y un código de desarrollo propio. Esta comparación, poco abordada en estudios previos, constituye junto con el desarrollo del código propio una de las aportaciones originales del trabajo. Todas las simulaciones incluyeron acoplamiento térmico-mecánico y condiciones de fricción representativas del conformado en caliente.

Keywords: Compresión, Aluminio AA2024, Simulación computacional, Desarrollo de código propio

1. INTRODUCCIÓN

El aluminio forjado es un material ampliamente utilizado en la industria aeroespacial y automotriz debido a su baja densidad, alta resistencia mecánica y a la corrosión, cualidades que permiten reducir peso, mejorar la eficiencia energética y favorecer la sostenibilidad [1],[2].

Sin embargo, el proceso de forjado presenta limitaciones vinculadas con la estrecha ventana de temperaturas de trabajo, la rápida disipación de calor y la sensibilidad a la velocidad de deformación, factores que incrementan la probabilidad de aparición de defectos. En este sentido, las simulaciones numéricas constituyen una herramienta clave para predecirlos, analizar el comportamiento del material [3] y optimizar tanto el diseño de preformas como los parámetros de proceso, contribuyendo a mejorar la calidad final de las piezas [4].

En Argentina se han identificado demandas crecientes relacionadas con el desarrollo de piezas de aluminio en empresas tradicionalmente especializadas en materiales ferrosos. A ello se suma que la disponibilidad y el costo de licencias de software específicos para forjado en caliente representan una limitación, lo que motiva el desarrollo y validación de herramientas de código libre aplicables al proceso.

(1) Instituto Nacional de Tecnología Industrial
(2) Universidad Nacional de Lomas de Zamora, Facultad de Ingeniería

El presente trabajo se centra en analizar la influencia de la temperatura de precalentamiento de las matrices en un proceso de compresión en caliente de un cilindro de aluminio aleación 2024, y en validar una herramienta de simulación propia basada en el método de elementos finitos que incorpora contacto, acoplamiento térmico y plasticidad. Este método es el estándar en la industria para procesos de forja y suele ser más veloz que otros métodos pensados para deformaciones extremas, los cuales también han sido desarrollados por los autores [5]. Para ello se estudia el efecto combinado de tres variables principales —la temperatura de precalentamiento de las placas de recalcado, la velocidad del proceso y el software de simulación empleado— sobre las fuerzas de conformado.

Los resultados obtenidos muestran que un incremento en la temperatura de las matrices reduce las cargas necesarias para el proceso, al tiempo que se observa una marcada sensibilidad a la velocidad de deformación. Asimismo, su pudo validar el correcto desempeño de un código de desarrollo propio como herramienta de apoyo en el diseño de procesos de forja.

2. METODOLOGÍA

Figura 1: Resumen de la metodología empleada

Interesa estudiar la influencia de temperaturas de matriz en un proceso de compresión en caliente, aplicando dos herramientas de simulación computacional comerciales. Por otra parte, tiene como objetivo este trabajo validar una herramienta libre y abierta, de desarrollo propio, destinada a este tipo de procesos.

2.1 Modelos en herramientas FEM comerciales

Influencia de la velocidad de desplazamiento de la matriz, a velocidad constante

Con el propósito de analizar la influencia de la temperatura del herramental en el conformado de probetas cilíndricas de aleación de aluminio 2024 de 25.4 mm de diámetro y 30 mm altura, se prepararon seis modelos numéricos en dos softwares comerciales, evaluados a dos velocidades de proceso, lo que resultó en un total de doce simulaciones.

Las velocidades seleccionadas representan respectivamente, la condición mínima asociada al accionamiento de una prensa hidráulica y la máxima correspondiente al accionamiento de una prensa mecánica. En cada caso, se consideraron tres temperaturas constantes para las matrices de recalcado: 20°C, 200°C y 420°C. La compresión se realizó a una altura final de 10 mm, lo que resulta en una reducción de altura para todos los casos de un 70% de la altura inicial. Todos los modelos son bidimensionales axil simétricos, con una malla inicial de un tamaño de elementos de 0.2 mm. Los modelos incluyen remallado automático.

Tabla 1 - Parámetros de simulación

	Descripción - modelo numérico a velocidad constante
Cantidad de corridas	12
Softwares utilizados	2 softwares comerciales específicos para conformado
Temperatura de herramental	20°C, 200°C y 420°C
Grado de compresión	70 %
Velocidad de desplazamiento	6 mm/s y 1200 mm/s (a velocidad constante)
Material utilizado	Aluminio AA2024 (obtenidos de la librería de cada software)
Temperatura del material	420°C
Coeficiente de fricción	Coulomb μ=0.3 constante

	Descripción - modelo numérico según cinemática de prensa
Cantidad de corridas	6
Maquinas principales	Prensa mecánica 630 t, 30 rpm Prensa fricción 10 kJ, 200 t, 700 mm/s

Influencia de la velocidad de desplazamiento de la matriz, según cinemática de prensa

Tras analizar los resultados de carga a las velocidades extremas, se pasó a considerar las velocidades propias de dos tecnologías de prensa: mecánica y de fricción. Para ello se realizaron seis simulaciones.

2.2 Desarrollo de herramienta FEM propia

El solver propio de Elementos Finitos (FEM) es un código diseñado específicamente para simular procesos de manufactura que involucran grandes deformaciones, contacto no lineal, acoplamiento térmo-mecánico y remallado automático (https://github.com/luchete80/WeldFormFEM). El solver emplea un esquema explícito [6] para la integración temporal, lo que lo hace particularmente robusto para problemas altamente no lineales con contacto complejo y grandes distorsiones de malla. Está escrito en C++ y ofrece capacidades de ejecución tanto en CPU como en GPU (CUDA, esta última en desarrollo), priorizando el rendimiento computacional mediante una estructura de datos del tipo Structure of Arrays (SOA) optimizada para acceso en

memoria. Soporta OpenMP para paralelización en CPU y CUDA para ejecución en GPU. Soporta elementos hexaédricos de 8 nodos y tetraédricos de 4 nodos, priorizando estos últimos por su facilidad de remallado y adaptación a geometrías complejas, como en los softwares comerciales. Utiliza integración reducida (un punto de Gauss por elemento) para acelerar el cálculo y aplica el método F-bar [7] para estabilizar el bloqueo volumétrico típico de los tetraedros. El esquema explícito se eligió por su simplicidad en contacto y tensiones, aunque se encuentra en desarrollo una variante implícita para procesos cuasi estáticos. El solver incorpora un cálculo de contacto por el método de penalización asumiendo las matrices como rígidas y en principio a temperatura constante. Asimismo, implementa un acoplamiento mecánico térmico secuencial y ya está en funcionamiento una versión axil-simétrica. Esta versión no se implementó ya que se prefirió estudiar el comportamiento de los tetraedros en los cuales el remallado es más inmediato, y además permiten resolver cualquier geometría.

El remallado se encuentra en una instancia experimental y se ejecuta en intervalos regulares proyectando variables internas a la nueva malla. Actualmente no incluye suavizado con variables históricas previas, lo que puede generar difusión numérica y oscilaciones en tensiones; para mitigarlo se aplica amortiguamiento de velocidad y aceleración, y se prevé incorporar un promediado ponderado entre tensiones pre y post-remallado.

Los modelos se resolvieron en 3D: dos cilindros completos con 12 000 y 20 000 elementos, y un cuarto de cilindro con 25 000 elementos y simetría en X e Y. En todos los casos se aplicó mass scaling 10X para aumentar el paso temporal y reducir el tiempo de cálculo. En la malla menos densa se implementó además un remallado experimental cada 4000 pasos, dado que la técnica aún está en desarrollo y se evalúan distintos parámetros. Para el modelo se utilizó un material de Hollomon, con una temperatura inicial de pieza y matriz de 20°C, un coeficiente de transmisión entre estas de 25000W (m2-°C). Se asume que el 90% del calor generado por deformación plástica se convierte en calor (coeficiente de Taylor-Quinney). Se utilizó un material de Hollomon de tipo $\sigma_y = K\varepsilon^n$ siendo σ_y la tensión de fluencia, $K = 386.796MPa$ y $n = 0.154$.

Todas las corridas se realizaron en un procesador Intel i7-10700@ 2.90GHz, paralelizado en 7 núcleos, y demorando el modelo de malla más gruesa unos 300s y el modelo de malla refinada unos 1300s.

3. RESULTADOS

3.1 Influencia de la velocidad de desplazamiento de la matriz, a velocidad constante

Con el objetivo inicial de analizar la influencia de la temperatura del herramental en la conformabilidad de probetas de AA2024 se realizaron 12 simulaciones con dos softwares comerciales.

Tabla 2 - Resultados de carga vs velocidad del mazo y temperatura del herramental

Corrida	Temperatura del herramental (°C)	Velocidad del mazo (mm/s)	Carga (kN) Software 1	Carga (kN) Software 2	Diferencia (%)
1	20	6	278 (*)	369	(*)
2	200	6	279	277	0.7
3	420	6	159	148	7.0
4	20	1200	195	202	0.4
5	200	1200	195	209	7.0
6	420	1200	188	208	11.0

(*) En el software 1, en la corrida a menor velocidad y con las matrices a temperatura ambiente, el material alcanzó temperaturas inferiores a la definida en las curvas de comportamiento, cuyo valor es de 300°C. Con lo cual ese valor no puede tomarse como válido.

Se puede apreciar que, a mayor velocidad de desplazamiento del mazo (1200 mm/s), las diferencias en los valores de carga no son significativas. Esto se debe a que, al aumentar la velocidad del proceso, el tiempo de contacto disminuye y con él la transferencia térmica. A menor velocidad de desplazamiento del mazo (6 mm/s), resulta conveniente el precalentamiento del herramental ya que las cargas disminuyen sustancialmente (un 40% con precalentamiento a 420 °C).

Influencia de la velocidad de desplazamiento de la matriz, según cinemática de prensa

Con el objetivo de analizar la diferencia de dos conceptos de prensas diferentes (fricción y cigüeñal), a continuación, se presenta la influencia de la velocidad de desplazamiento sobre la carga de conformado.

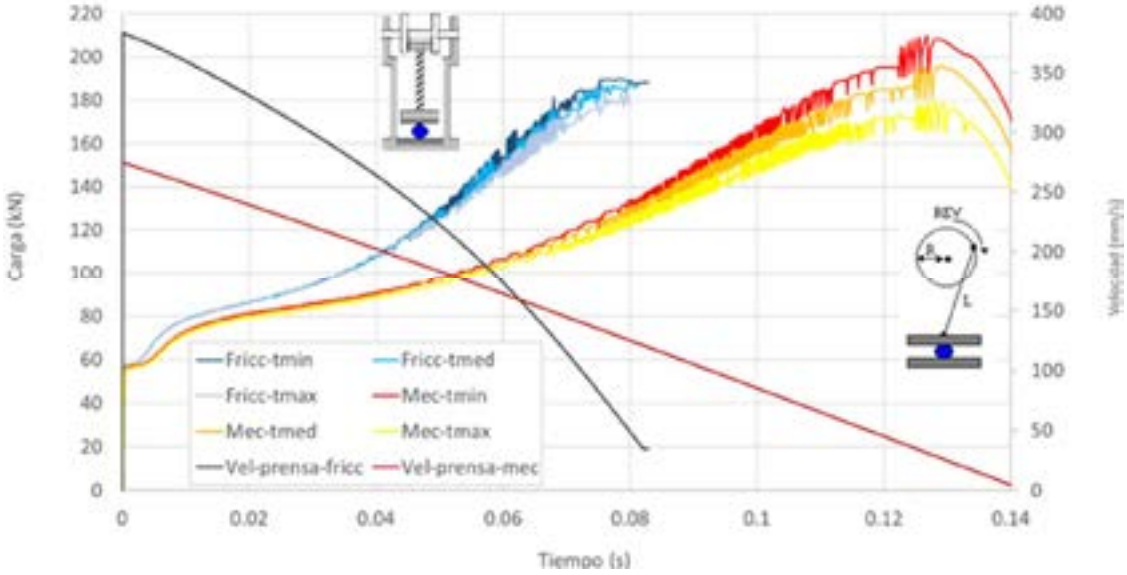


Figura 2: Influencia del tipo de máquina principal en la carga de conformado

La velocidad de desplazamiento de la prensa de fricción seleccionada de 375 mm/s, (30% de la máxima) produce que las diferencias de carga considerando las tres temperaturas de herramental sean más acotadas que el mismo proceso realizado en la prensa de cigüeñal, donde la velocidad máxima en el período de contacto es de 275 mm/s.

La diferencia de cargas en la prensa de fricción entre la máxima temperatura y la mínima del herramental resulta del 3%, mientras que para la prensa de excéntrica del 6%.

3.2 Resultados de Herramienta FEM propia

En esta sección se presentan los resultados obtenidos a partir de modelos con tres mallas diferentes. En la figura 3 puede observarse que las cargas resultantes no difieren entre sí. Cabe señalar que la malla más refinada corresponde únicamente a ¼ de cilindro, lo que implica una densidad de elementos considerablemente mayor que en los otros casos. Asimismo, las cargas calculadas con la herramienta propia muestran muy buena concordancia con las obtenidas mediante los softwares comerciales. Este análisis se hizo sólo hasta aproximadamente 10 mm, punto en el cual la excesiva distorsión de la malla produce la interrupción de la corrida. Con relación a esta situación se hicieron algunos ensayos de remallados que se muestran al final de esta sección.

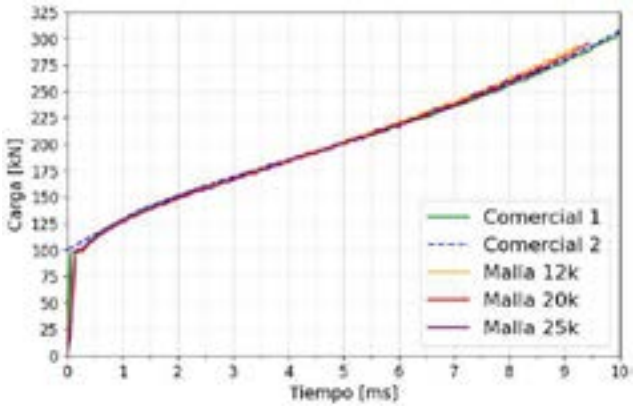


Figura 3: Carga matriz superior - influencia de malla

En adelante, todos los resultados corresponden a un desplazamiento vertical de la placa móvil de recalcado de 10,25 mm. En la Figura 4 se muestran los desplazamientos laterales de la probeta. Puede verse que la geometría en herramientas comerciales y la herramienta desarrollada son similares, con lo cual se verifica que la formulación de contacto con fricción es correcta. El error máximo observado fue de un 3%, siendo los valores de la herramienta propia ligeramente menores.

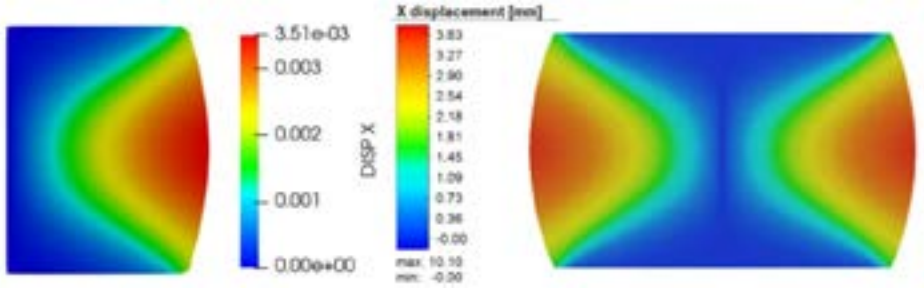


Figura 4: Desplazamientos laterales. Herramienta propia (izq) vs. herramienta comercial 1(der)

La figura 5 presenta las deformaciones plásticas equivalentes para la malla más densa de un cuarto de cilindro. Puede observarse que los mapas tienen una distribución similar, aunque los valores absolutos son menores. Esto tiene probable relación con la menor densidad de malla en el caso de la herramienta propia y con la excesiva distorsión de los elementos al no aplicar un remallado, debido a que, fundamentalmente, en el apoyo, los máximos son muy puntuales. Mas allá de esto, la distribución del mapa es similar en ambos casos.

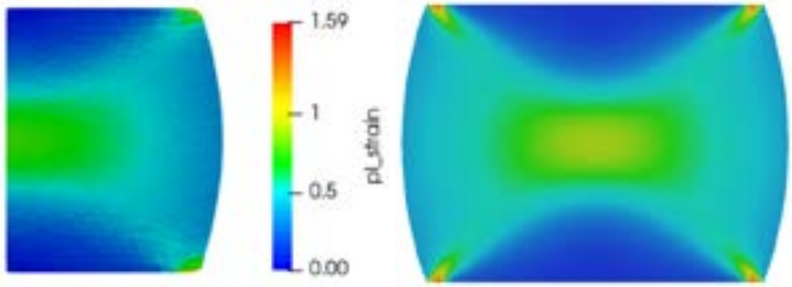


Figura 5: Deformaciones plásticas equivalentes. Herramienta propia (izquierda.) vs.Comercial (derecha)

En la figura 5 se presentan las temperaturas en el mismo instante de tiempo de los mapas anteriores. Puede observarse nuevamente una subestimación de los valores absolutos dado que la temperatura es producto del calor generado por deformación plástica.

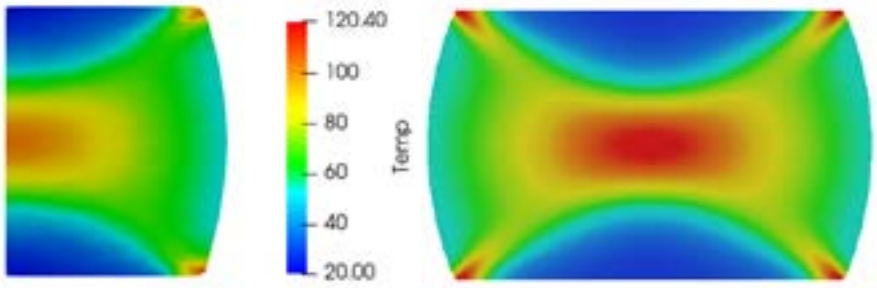


Figura 6: Perfil de temperaturas, software propio (izquierda) vs. Comercial (derecha)

La figura 7 muestra la geometría de una probeta deformada 10,25 mm sin remallado (izq.) y con remallado (centro). El módulo de remallado aún está en desarrollo e incluye amortiguamiento, mapeo de variables y recálculo del paso de tiempo. La simulación con remallado presenta ondas de alta frecuencia propias de la regeneración de malla y pequeñas diferencias entre corridas, debido a la discretización. En las zonas más deformadas se observa un "ablandamiento" por el mapeo al elemento más cercano, aunque se está implementando una proyección por mínimos cuadrados para corregirlo. Pese a ello, las distribuciones plásticas globales son comparables a las del caso sin remallado y la respuesta en carga se aproxima a la de los softwares comerciales. En la misma figura, a la derecha, se muestra el campo de presiones en la zona de apoyo: sin remallado (mitad izq.) aparece un comportamiento oscilatorio, mientras que con remallado (mitad der.) la presión se estabiliza.

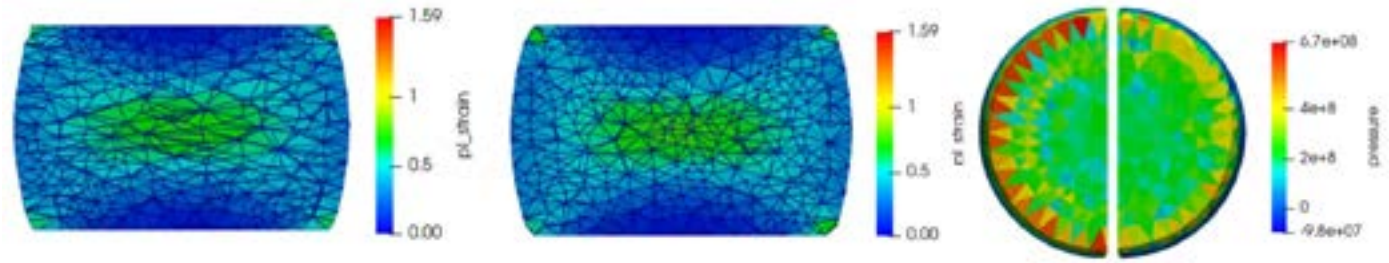


Figura 7: Deformación plástica equivalente. (izquierda) vs. Presión en zona de contacto (derecha)

4. CONCLUSIONES (Y FUTUROS TRABAJOS)

Las simulaciones realizadas en prensas mecánica y de fricción muestran que los procesos más lentos, combinados con el precalentamiento del herramental, reducen significativamente las cargas, ya que la transmisión de calor entre probeta y matriz modifica la temperatura del material y su resistencia. En particular, las simulaciones teóricas con velocidades extremas de 1200 mm/s y 6 mm/s evidenciaron que, en la condición más lenta, es posible lograr reducciones de carga de hasta un 40% cuando la matriz se precalienta a 420 °C, resultados en línea con el comportamiento esperado del material.

En este trabajo se presentó además el desarrollo y validación de una herramienta propia de elementos finitos basada en elementos tetraédricos, con capacidades de remallado, estabilización de presiones y acoplamiento térmico. Las curvas de carga obtenidas para un material de Hollomon mostraron buena concordancia con las simulaciones comerciales, lo que valida el desempeño del solver. El remallado permitió reducir la distorsión en zonas críticas como el centro de la probeta y el borde de apoyo, asegurando una mejor representación del proceso.

Finalmente, como líneas de desarrollo futuro, se prevé la incorporación del contacto, la validación en modo axial simétrico y la mejora de los algoritmos de proyección de tensiones y deformaciones, con el fin de estabilizar y robustecer el proceso de remallado.

REFERENCIAS

[1] DENG L, WANG X, JIN J ET AL (2018). Precision forging technology for aluminum alloy. Front. Mech. Eng. 13, 25–36. DOI: 10.1007/s11465-018-0477-y

[2] DEEKSHANT V, KAUSHAL K (2021). Application and use of different aluminium alloys with respect to workability, strength and welding parameter optimization, Ain Shams Engineering Journal, Volume 12, Issue 1.

[3] ABATE G, PEREYRA OSENDA A, MARTINEZ KRAHMER D. Degree of deformation versus microhardness of an AISI 1010 cold forged steel, SENAFOR 2022.

[4] YIIN-KUEN F, JYUN-KAI S, IMANG EKO S, CHI-PENG C, CHENG-FU H, HAO-YUN K, CHIEN-WEI C (2023). Preform design with increased materials utilization and processing map analysis for aluminum hot forging process, Journal of Manufacturing Processes, Volume 90.

[5] L. BUGLIONI, G. ABATE, A.J. SÁNCHEZ EGEA, D. MARTÍNEZ KRAHMER. Ampliación de la Simulación de Procesos de Conformado Plástico: Transición de FEM a SPH con Implementación en GPUs. SENAFOR 2024.

[6] D. J. BENSON, Computational methods in Lagrangian and Eulerian hydrocodes, Computational Methods in Applied Mechanics and Engineering, vol. 99, 1992, pp. 235–394.

[7] BELYTSCHKO, LIU & MORAN (2000) Nonlinear Finite Elements for Continua and Structures.

44º SENAFOR

28ª Conferência Internacional de Forjamento - Brasil
14ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas / 11º Congresso do BrDDRG
14ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis
3ª Conferência Internacional de Inovação em Materiais e Manufatura
Porto Alegre, RS, dias 1, 2 e 3 de outubro de 2025
www.senafor.com

APLICAÇÃO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA PREVISÃO DE DUREZA DE PEÇAS FORJADAS A QUENTE

Peterson Duarte Diehl [1]
André Rosiak [2]
Roderval Marcelino [3]
Lirio Schaeffer [4]

RESUMO

Este estudo investiga a aplicação de técnicas de aprendizado de máquina para a predição da dureza de aços bainíticos forjados, com o objetivo de aprimorar o controle inteligente do processo. Para tal finalidade, foi desenvolvida uma base de dados experimental, incluindo parâmetros termomecânicos-chave do processo e os valores de dureza dos componentes forjados. O desempenho dos modelos Rede Neural Artificial (RNA), Máquina de Vetores de Suporte (SVM) e Floresta Aleatória (RF) foi avaliado. A RNA, configurada com três camadas ocultas (64, 128 e 256 neurônios), apresentou o melhor desempenho, alcançando um Erro Absoluto Médio (MAE) de 1,3518 HV, Erro Quadrático Médio (MSE) de 8,8448 HV^2 e um Coeficiente de Determinação (R^2) de 0,994. Testes de inferência confirmaram a robustez e a aplicabilidade prática do modelo, validando seu uso em cenários reais de forjamento, como a previsão da dureza de bielas forjadas. Os resultados demonstram que a utilização de modelos baseados em inteligência artificial pode apoiar de forma eficaz a tomada de decisão e o ajuste dinâmico do processo de forjamento, possibilitando a identificação de inconsistências produtivas e a implementação de correções em tempo real.

Palavras-chave: Inteligência Artificial, Forjamento, Aço Bainítico, Aprendizado de Máquina.

1. INTRODUÇÃO

Grandes esforços têm sido realizados para melhorar as propriedades mecânicas dos aços forjados para aplicações críticas em peças de segurança. Entre os desenvolvimentos estão os aços bainíticos [1]. Os aços bainíticos combinam as propriedades ideais dos aços temperados e revenidos (Q&T) com uma rota de produção curta. A versatilidade e os custos racionais de produção tornaram estes aços a escolha ideal para componentes estruturais na engenharia automotiva. Os valores de resistência mecânica e tenacidade dos bainíticos estão dentro da faixa alcançada pelos aços Q&T temperados e revenidos, como o DIN 42CrMo4. As análises de resistência à fadiga também indicam melhores propriedades dinâmicas do que os aços Q&T [2].

A rota de processamento termomecânico dos aços bainíticos inclui o aquecimento a temperaturas em torno de 1200°C, forjamento e resfriamento contínuo. A aplicação do resfriamento contínuo, em detrimento ao uso de longos tratamentos isotérmicos ou têmpera e revenimento convencionais, é capaz de reduzir significativamente o consumo de energia e, consequentemente, os custos de fabricação [3].

As propriedades finais de peças forjadas são determinadas tanto pela composição química quanto pelas condições de processamento. Em particular, os parâmetros de conformação e resfriamento são extremamente sensíveis e exercem influência direta na robustez da produção. Diferenças no histórico térmico entre a superfície e o núcleo da peça podem resultar em microestruturas distintas, levando à formação de gradientes nas propriedades mecânicas [4]. A capacidade de correlacionar dados de produção coletados em tempo real com a qualidade do produto final — permitindo a identificação precoce de desvios e fornecendo suporte ágil e preciso à tomada de decisões — torna as ferramentas de Inteligência Artificial altamente promissoras para o ajuste dinâmico do processo de forjamento de aços bainíticos.

A aplicação de ferramentas de Inteligência Artificial (IA) tem demonstrado grande potencial para transformar a indústria, impulsionando avanços significativos em eficiência, qualidade e inovação. No contexto da conformação mecânica, modelos baseados em IA já foram desenvolvidos com o objetivo de otimizar rotas de processamento [5,6], prever falhas e defeitos [7–11], além de estimar o comportamento de materiais sob condições complexas de carga, capturando relações não lineares entre tensões e deformações [12–17]. A IA também tem sido aplicada no controle em tempo real de processos de conformação, especialmente em sistemas com monitoramento de qualidade, nos quais redes neurais são treinadas para ajustar automaticamente os parâmetros do processo com base em dados fornecidos por sensores [18-20].

Este estudo investiga a aplicação de técnicas de aprendizado de máquina para o controle da qualidade de produtos forjados bainíticos, por meio da predição da dureza das peças com base em dados experimentais do processo. O processo analisado envolve um aço microligado de baixo carbono, com composição química 0,18C–1,38Mn–0,36Si–0,47Cr–0,03Mo–0,05Al–0,04Nb–0,01Ti, que é aquecido a altas temperaturas, forjado e resfriado continuamente ao ar. O forjamento é realizado em corpos de prova com geometria de cunha, permitindo a geração de diferentes combinações de parâmetros termomecânicos ao longo da peça. Os dados obtidos por sensoriamento e simulação numérica resultam em um banco de dados com 2.955 registros, utilizados no treinamento e na calibração de modelos de Redes Neurais Artificiais (RNA), Máquinas de Vetores de Suporte (SVM) e Florestas Aleatórias (RF).

A definição de um modelo capaz de compreender as complexas correlações entre os dados de dureza final e os parâmetros termomecânicos constitui uma ferramenta eficaz para o controle do processo de forjamento, permitindo a identificação de inconsistências produtivas e a implementação de correções em tempo real.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo investiga o uso de técnicas de aprendizado de máquina para prever a dureza de produtos forjados com base em dados experimentais. A Figura 1 mostra esquematicamente a metodologia empregada. O trabalho é desenvolvido em três fases principais compostas, respectivamente, pela (i) criação do conjunto de dados; (ii) previsão e análise (iii) teste de inferência. A seguir, cada uma destas etapas é detalhada.

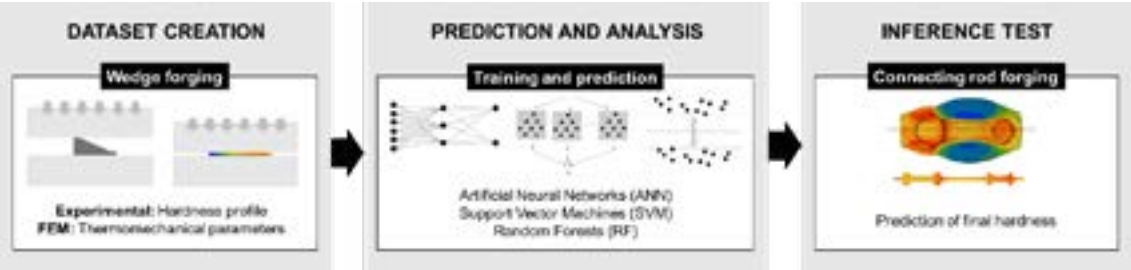


Figura 1 Metodologia empregada.

2.1 Criação do banco de dados

A dureza de um componente bainítico forjado a quente é determinada pelas condições do processamento termomecânico [21]. O desenvolvimento de ferramentas baseadas em inteligência artificial (IA) para prever a dureza desses componentes exige a construção de um banco de dados robusto [22,23], capaz de capturar as inter-relações entre os diversos parâmetros termomecânicos do processo e a dureza final. Para isso, é necessário gerar um grande número de combinações entre parâmetros de processo e os correspondentes valores de dureza.

Uma estratégia eficiente para obter diferentes combinações de parâmetros termomecânicos e respectivos valores de dureza, consiste no forjamento de amostras na forma de cunha entre matrizes planas paralelas [24]. Como resultado, as amostras sofrem deformações que variam ao longo do corpo de prova. A combinação do procedimento experimental com análises numéricas gera uma ampla gama de resultados sem a necessidade de um número elevado de testes. Essa é uma forma econômica e ágil de avaliar o efeito da deformação e da velocidade de deformação nas mudanças microestruturais que ocorrem durante a deformação a quente.

Essa abordagem foi empregada para gerar o conjunto de dados utilizado no treinamento e na calibração dos modelos de inteligência artificial. O processo de forjamento das cunhas é representado esquematicamente na Figura 2. O material investigado, um aço microligado com a composição química 0,18C–1,38Mn–0,36Si–0,47Cr–0,03Mo–0,05Al–0,04Nb–0,01Ti, foi forjado em três temperaturas distintas,

após o aquecimento em forno resistivo a 1000°C, 1100°C e 1200°C. A realização dos ensaios em diferentes temperaturas teve como objetivo ampliar a diversidade do banco de dados, incorporando múltiplas combinações de condições de resfriamento. As informações técnicas detalhadas do processo de forjamento das cunhas, incluindo parâmetros termomecânicos e operacionais relevantes, estão apresentadas na Tabela 1. Mais detalhes sobre os ensaios de cunha estão disponíveis em [21].

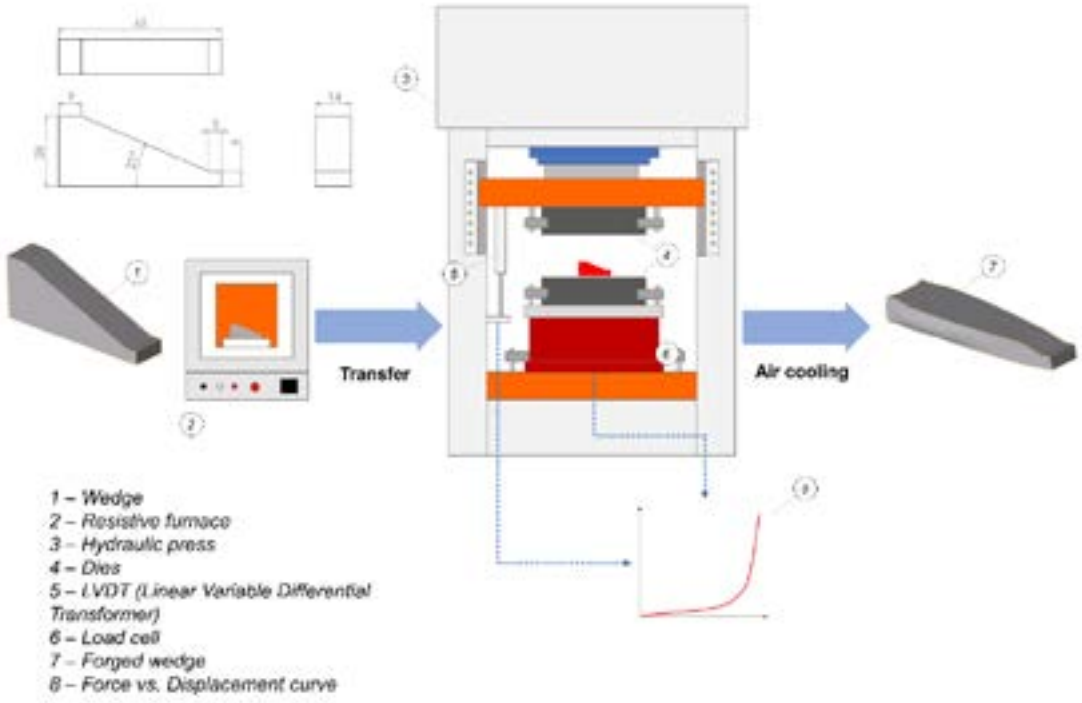


Figura 2 Forjamento das cunhas.

Durante os testes, foi realizada a aquisição de dados de força e deslocamento. O deslocamento da prensa foi monitorado por um transdutor de deslocamento variável linear (Linear Variable Differential Transformer-LVDT) e a força por uma célula de carga montada na mesa inferior da prensa. A temperatura das peças também foi monitorada a partir de um termopar tipo K introduzino no núcleo de cada amostra. Os sinais foram adquiridos pelo aparelho Spider 8 da marca HBM e tratados pelo software Catman Express.

Os dados de força, deslocamento e temperatura foram utilizados como variáveis de entrada na análise inversa do procedimento experimental, realizada por meio do software QForm UK. Aplicando o método dos elementos finitos, foram efetuadas simulações tridimensionais (3D) dos ensaios de forjamento. Os dados experimentais e numéricos foram complementados pelos correspondentes valores de dureza obtidos em cada cunha. As amostras forjadas foram seccionadas, e o perfil de microdureza foi determinado ao longo da seção longitudinal de cada cunha.

O conjunto de dados foi composto por informações de dureza, deformação equivalente (φ), velocidade de deformação ($\dot{\varphi}$), temperatura inicial (ϑ_i) — correspondente à temperatura de aquecimento das cunhas — e temperatura final (ϑ_f),

referente à temperatura ao final do forjamento, imediatamente após a abertura da prensa. Ao todo, foram gerados 2.955 registros. A relação entre os dados dos parâmetros termomecânicos e os valores de dureza está apresentada na Figura 3. Observa-se que a dureza apresenta uma variação não linear em função de todos os parâmetros analisados, o que evidencia a complexidade das interações envolvidas no processo de forjamento a quente.

Tabela 1 Informações técnicas detalhadas do processo de forjamento das cunhas.

Material	0,18C–1,38Mn–0,36Si–0,47Cr–0,03Mo–0,05Al–0,04Nb–0,01Ti
Temperatura do material	1000°C
	1100°C
	1200°C
Método de aquecimento do material	Forno resistivo
Tempo de aquecimento	30min
Temperatura das ferramentas	150°C
Lubrificação	Solução a base de grafite
Equipamento de forjamento	Prensa hidráulica ($v = 5mm/s$)
Redução de altura	82%
Resfriamento após o forjamento	Contínuo ao ar

Tabela 2 Estatísticas descritivas do conjunto de dados

Variável	Média	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
Deformação, φ [-]	1,549	0,657	0,180	2,135
Velocidade de deformação, $\dot{\varphi}$ $[s^{-1}]$	1,395	0,178	0,636	1,623
Temperatura inicial, ϑ_i $[°C]$	1100°C	81,718	1000	1200
Temperatura final, ϑ_f $[°C]$	443,7°C	26,695	43,9	535,8
Dureza, H [HV]	319,99	40,223	249,7	455,5

A Tabela 2 apresenta as estatísticas descritivas do conjunto de dados. É importante considerar que os modelos de inteligência artificial (IA) desenvolvidos serão capazes de prever as propriedades de forjados produzidos por rotas termomecânicas cujos parâmetros estejam contidos dentro das faixas representadas no banco de dados. Processos de fabricação que envolvam condições distintas requerem a geração de novos dados para ampliar a cobertura e, consequentemente, a precisão e a capacidade de generalização dos modelos.

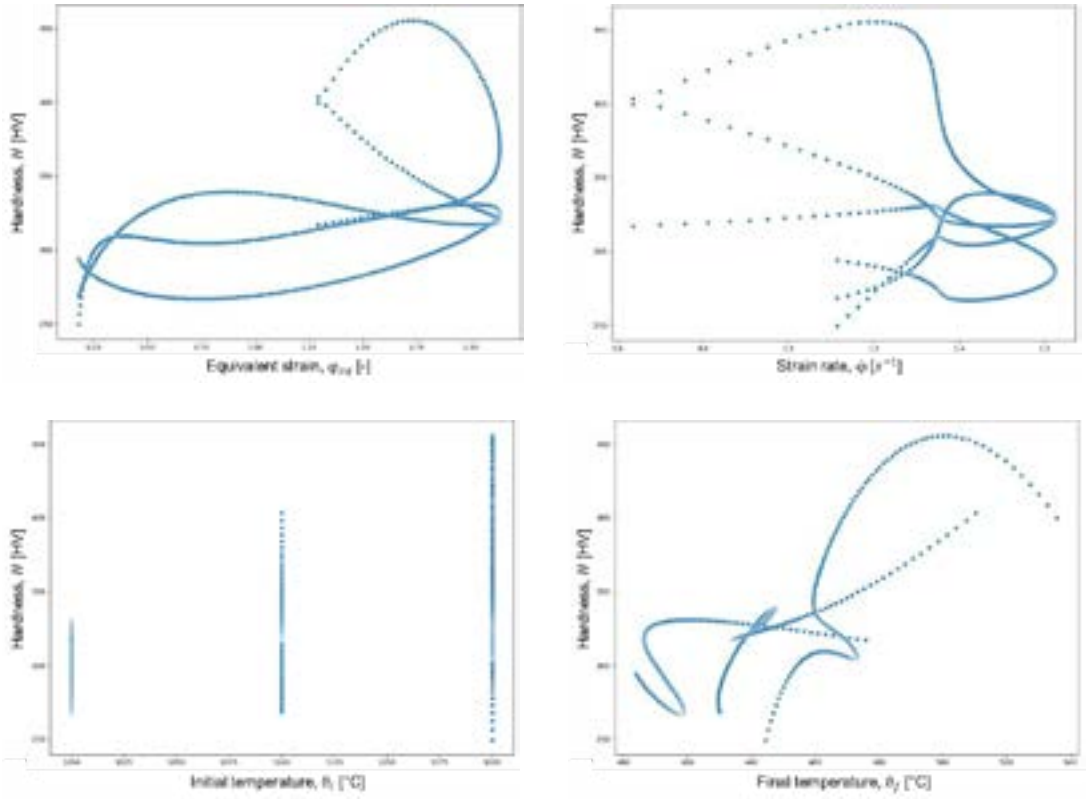


Figura 3 Relação entre os dados dos parâmetros termomecânicos e os valores de dureza.

2.2 Predição e análise

A etapa de predição e análise foi realizada por meio do desenvolvimento de modelos de Redes Neurais Artificiais (RNA) utilizando as bibliotecas TensorFlow e Keras, que oferece uma plataforma flexível e eficiente para a construção, o treinamento e a validação de modelos de aprendizado profundo.

Previamente ao treinamento dos modelos de inteligência artificial, o conjunto de dados foi submetido a uma etapa de pré-processamento, visando garantir a consistência e a eficiência do processo de modelagem. Inicialmente, todos os atributos contínuos foram normalizados. A normalização é uma etapa fundamental no pré-processamento de dados, especialmente em problemas que envolvem algoritmos de aprendizado de máquina. Ela consiste em ajustar os valores das variáveis para que todos fiquem dentro de uma mesma escala, evitando que atributos com magnitudes maiores dominem o processo de treinamento [25,26].

No presente trabalho, foi utilizada a normalização Min-Max, que transforma cada valor da variável de entrada para a faixa [0, 1], de acordo com a seguinte fórmula:

$$X_{norm} = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}}$$

Onde X é o valor original e X_{norm} o valor normalizado. X_{min} e X_{max} correspondem, respectivamente, ao menor e maior valor observados para a variável. Este procedimento foi implementado utilizando o MinMaxScaler da biblioteca scikit-

learn, que automatiza o cálculo e a aplicação dessa transformação em todos os atributos selecionados.

O conjunto de dados normalizados foi dividido aleatoriamente, sendo 70% destinado ao treinamento e 30% à validação do modelo. A divisão aleatória, repetida em diferentes execuções, visa aumentar a robustez estatística dos resultados, reduzindo o risco de que padrões específicos ou distribuições anômalas em uma única partição afetem negativamente o desempenho e a capacidade de generalização da RNA.

Para a otimização dos pesos da rede, optou-se pelo algoritmo Adam (Adaptive Moment Estimation), amplamente reconhecido por sua eficiência e estabilidade, especialmente em problemas que envolvem conjuntos de dados complexos e funções de perda potencialmente não convexas. O Adam combina as vantagens dos métodos de gradiente estocástico com a adaptação individual das taxas de aprendizado para cada parâmetro, o que favorece uma convergência mais rápida e confiável [27].

A função de perda escolhida foi o Erro Quadrático Médio (MSE), em virtude de sua adequação a problemas de regressão contínua, como a previsão de dureza, e de sua propriedade de penalizar de forma mais intensa os erros de maior magnitude, estimulando ajustes mais precisos do modelo.

Para evitar o sobreajuste (overfitting) — um risco inerente em modelos de aprendizado profundo, especialmente quando o número de parâmetros da rede é elevado — foi implementado o mecanismo de parada antecipada (early stopping). Esse procedimento monitora o desempenho do modelo no conjunto de validação e interrompe o treinamento automaticamente caso não seja observada melhoria após um número predefinido de épocas consecutivas, evitando que o modelo se ajuste excessivamente ao ruído dos dados de treinamento. O número máximo de épocas foi estabelecido em 300, como um limite prudencial que equilibra a necessidade de permitir a convergência adequada da RNA sem incorrer em excessivo custo computacional ou risco de sobreajuste.

A avaliação do desempenho preditivo da rede foi realizada a partir de três métricas complementares: o Erro Médio Absoluto (MAE), que fornece uma medida direta da média dos erros absolutos cometidos pelo modelo; o Erro Quadrático Médio (MSE), que quantifica a média dos erros elevados ao quadrado, dando maior peso a desvios mais expressivos; e o Coeficiente de Determinação (R^2), que expressa a proporção da variância total dos dados que é explicada pelo modelo, sendo um indicador global da qualidade do ajuste e da capacidade preditiva.

Com o objetivo de avaliar a robustez e a capacidade preditiva da Rede Neural Artificial (RNA) desenvolvida, foram também implementados e testados dois outros modelos amplamente utilizados em tarefas de regressão: Máquinas de Vetores de Suporte (SVM) e Floresta Aleatória (RF).

As Máquinas de Vetores de Suporte (SVM) são modelos baseados na teoria de maximização de margens, originalmente concebidos para problemas de classificação, mas que podem ser adaptados para regressão por meio da técnica conhecida como Support Vector Regression (SVR). A SVM busca encontrar uma função que aproxime

os dados dentro de uma margem de tolerância aceitável, minimizando ao mesmo tempo a complexidade do modelo [28,29]. Neste trabalho, foi utilizado o kernel RBF (Radial Basis Function), uma função amplamente empregada por sua capacidade de modelar relações não lineares, ajustando-se de forma flexível às características do conjunto de dados [30]. O modelo SVM foi desenvolvido com a normalização prévia dos dados e o ajuste dos hiperparâmetros por meio de validação cruzada, buscando otimizar o equilíbrio entre viés e variância [31,32].

A Floresta Aleatória (Random Forest, RF), por sua vez, é um modelo baseado no princípio de ensemble learning, que consiste na combinação de múltiplas árvores de decisão para produzir um resultado mais robusto e menos suscetível a overfitting [33-35]. Neste estudo, a RF foi implementada com 100 árvores de decisão, configuradas com profundidade e número mínimo de amostras ajustados por meio de validação cruzada, com o objetivo de otimizar a generalização do modelo.

2.3 Testes de inferência

Com o objetivo de ampliar a avaliação da capacidade preditiva e de generalização do modelo desenvolvido, foram realizados testes de inferência utilizando dados não pertencentes ao conjunto originalmente empregado para o treinamento e a validação da Rede Neural Artificial. Essa abordagem visa simular condições reais de aplicação, em que o modelo é exposto a novos cenários, distintos daqueles previamente conhecidos.

Nos testes de inferência, o modelo foi aplicado para prever a dureza do material investigado após o forjamento a quente de uma biela. O processo experimental, representado esquematicamente na Figura 4, consistiu no aquecimento do material a 1200°C, seguido de sua transferência para uma prensa hidráulica, onde foi realizada a operação de forjamento. Após a extração da peça, o resfriamento foi conduzido de forma contínua ao ar até a temperatura ambiente.

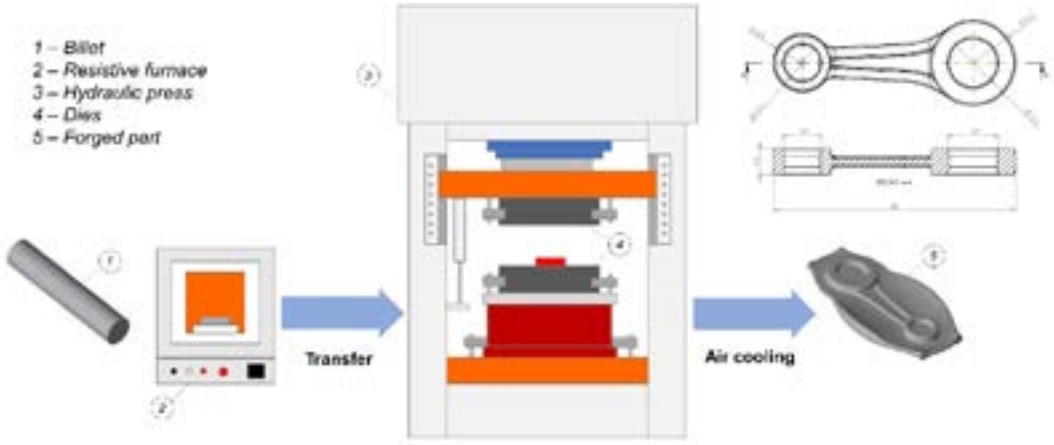


Figura 4 Forjamento da biela.

As informações técnicas detalhadas do processo de forjamento da biela, incluindo parâmetros termomecânicos e operacionais relevantes, estão apresentadas na Tabela 3. Posteriormente ao forjamento, as bielas foram seccionadas e o perfil de

microdureza foi determinado ao longo da seção longitudinal, conforme ilustrado na Figura 5.

Tabela 3 Informações técnicas detalhadas do processo de forjamento da biela.

Material	0,18C–1,38Mn–0,36Si–0,47Cr–0,03Mo–0,05Al–0,04Nb–0,01Ti
Temperatura do material	1200°C
Método de aquecimento do material	Forno resistivo
Tempo de aquecimento	30min
Temperatura das ferramentas	150°C
Lubrificação	Solução a base de grafite
Equipamento de forjamento	Prensa hidráulica ($v = 5mm/s$)
Resfriamento após o forjamento	Contínuo ao ar

Essa metodologia permitiu a comparação direta entre as previsões geradas pelo modelo de IA e os valores reais de dureza obtidos experimentalmente, constituindo uma etapa essencial para validar a eficácia e a aplicabilidade prática do modelo desenvolvido fora do domínio específico de treinamento.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Desempenho da Rede Neural Artifical

Como resultado das análises realizadas, foi definida uma arquitetura de Rede Neural Artificial composta por três camadas ocultas, configuradas com 64, 128 e 256 neurônios, respectivamente (Figura 5). Em todas as camadas ocultas foi utilizada a função de ativação ReLU (Rectified Linear Unit), dada a sua simplicidade computacional e capacidade de mitigar problemas relacionados ao gradiente desvanescente, favorecendo a eficiência e a estabilidade no treinamento de modelos profundos.

A escolha desse número de neurônios e da estrutura em múltiplas camadas reflete um equilíbrio entre a complexidade do modelo — necessária para capturar as inter-relações não lineares entre os parâmetros termomecânicos e a dureza — e a necessidade de evitar o sobreajuste, especialmente considerando a dimensão do conjunto de dados disponível.

Essa arquitetura se mostrou adequada para o problema proposto, permitindo que o modelo aprendesse com eficiência os padrões subjacentes aos dados e apresentasse bom desempenho nas etapas de validação e inferência.
A camada de entrada da Rede Neural Artificial é composta pelos quatro parâmetros termomecânicos principais: deformação equivalente, velocidade de deformação, temperatura inicial e temperatura final do forjamento. Esses atributos foram

selecionados por representarem as variáveis mais relevantes para a definição da microestrutura e, consequentemente, da dureza do material forjado.
A camada de saída consiste em um único neurônio, cuja função é prever o valor correspondente de dureza para cada combinação específica de parâmetros de entrada. Essa configuração caracteriza um modelo típico de regressão, adequado para a previsão de variáveis contínuas.

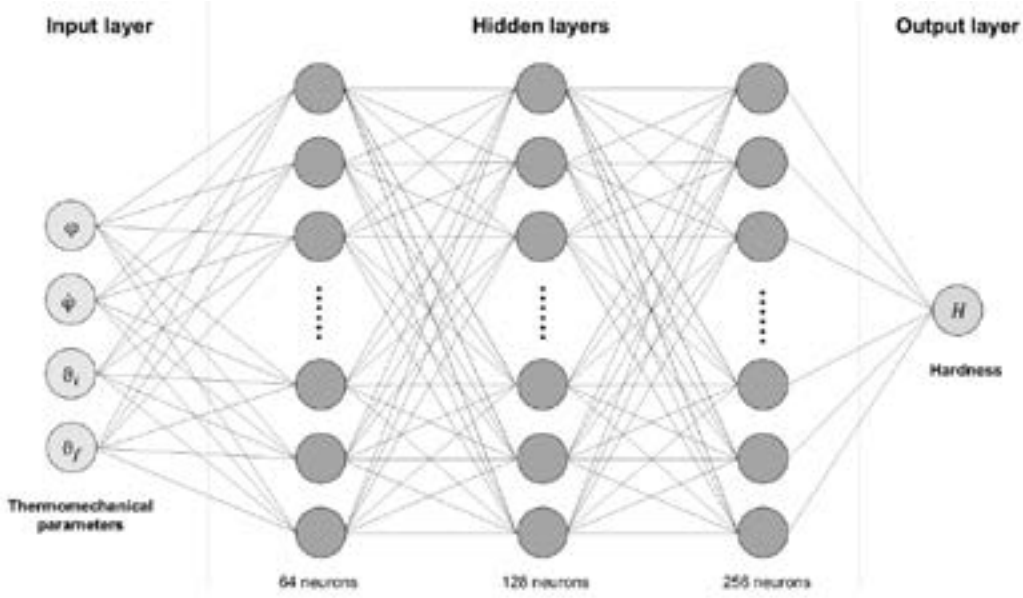


Figura 5 Arquitetura da Rede Neural Artificial proposta.

A complexidade da topologia da rede desempenha um papel fundamental no seu desempenho. Estruturas mais complexas, como a arquitetura adotada neste estudo — composta por três camadas ocultas configuradas com 64, 128 e 256 neurônios —, são capazes de capturar relações não lineares altamente intrincadas entre as variáveis, superando as limitações típicas de arquiteturas mais simples. Contudo, esse aumento expressivo de capacidade implica também a necessidade de maiores recursos computacionais, incluindo tempo de processamento, potência de hardware e, frequentemente, volumes mais amplos de dados de entrada para garantir um treinamento eficaz [35].

No desenvolvimento do modelo, buscou-se estabelecer um equilíbrio adequado entre a profundidade e a largura da rede, de modo a otimizar o desempenho preditivo sem comprometer excessivamente a eficiência computacional. Essa abordagem visa maximizar a eficácia do modelo, assegurando um aprendizado robusto e preciso, ao mesmo tempo que evita a complexidade desnecessária, que poderia conduzir ao sobreajuste ou à inviabilidade prática de sua aplicação.

A análise de convergência do modelo indicou uma redução consistente dos valores de Erro Médio Absoluto (MAE) e Erro Quadrático Médio (MSE) ao longo do processo de treinamento, conforme ilustrado na Figura 6. Inicialmente, observou-se uma redução progressiva dos valores de MAE e MSE, à medida que o modelo ajustava seus parâmetros para se adequar aos padrões presentes nos dados de treinamento. Esse comportamento evidencia o processo de aprendizado da rede, que busca minimizar as discrepâncias entre as previsões e os valores reais. Com o avanço das iterações, os erros convergiram para valores relativamente baixos, indicando que a RNA estava aprendendo de forma eficaz e se aproximando de uma solução ótima. Posteriormente, os gráficos da Figura 6 revelam uma estabilização nas métricas de erro, com variações mínimas ao longo das últimas épocas. Esse padrão sugere que o

modelo atingiu um ponto de saturação, no qual ajustes adicionais não resultam em melhorias significativas no desempenho, caracterizando a convergência do processo de treinamento e confirmando a adequação da arquitetura e dos hiperparâmetros adotados.

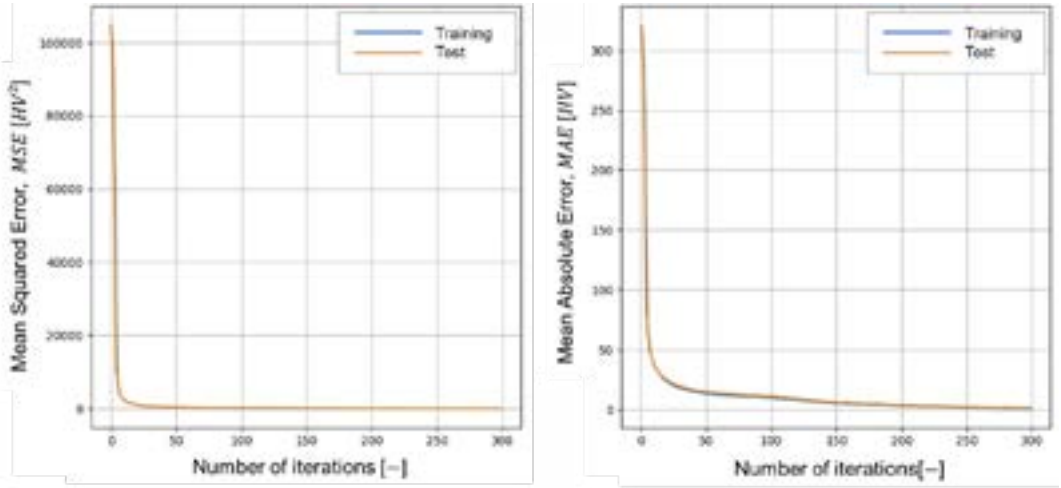


Figura 6 Análise de convergência do modelo através da evolução do Erro Quadrático Médio (MSE) e do Erro Médio Absoluto (MAE) em função do número de iterações.

Os resultados obtidos para o modelo desenvolvido demonstram um desempenho preditivo altamente satisfatório. Após as 300 iterações, o Erro Absoluto Médio foi de 1,3518 HV e o Erro Quadrático foi de 8,8448 HV². O valor do Erro Médio Absoluto (MAE) de 1,3518 HV indica que, em média, as previsões da Rede Neural Artificial diferem menos de 2 unidades de dureza Vickers em relação aos valores reais. Esse nível de erro é extremamente baixo, sobretudo considerando a variabilidade típica de processos de forjamento a quente e a complexidade das relações não lineares entre os parâmetros termomecânicos e a dureza. De forma complementar, o Erro Quadrático Médio (MSE) de 8,8448 HV² confirma a precisão do modelo, evidenciando que os desvios mais expressivos foram raros e de baixa magnitude. O valor reduzido do MSE reforça a capacidade do modelo de capturar com fidelidade os padrões subjacentes aos dados, minimizando tanto os erros sistemáticos quanto as flutuações aleatórias.

Esses indicadores atestam a eficácia da arquitetura de RNA definida, bem como a adequação do conjunto de dados e dos procedimentos de pré-processamento e treinamento adotados. Além disso, os baixos valores de erro sugerem que o modelo possui elevada capacidade de generalização.

O valor obtido para o Coeficiente de Determinação (R^2) foi de 0,994, indicando que o modelo desenvolvido é capaz de explicar aproximadamente 99,4% da variância presente nos dados de dureza, o que evidencia uma excelente capacidade preditiva. Esse resultado confirma que a Rede Neural Artificial foi altamente eficaz na modelagem das complexas relações não lineares entre os parâmetros termomecânicos e a dureza resultante do material forjado.

A análise gráfica da relação entre os valores de dureza previstos e reais (Figura 7) reforça essa conclusão. Observa-se que a maioria dos pontos está fortemente concentrada ao longo da linha de referência (traçado vermelho), que representa a correspondência ideal entre previsão e realidade. A distribuição próxima dessa linha, com pequenas dispersões, indica que o modelo apresenta baixo erro sistemático e boa generalização, mesmo diante de variações naturais do processo.

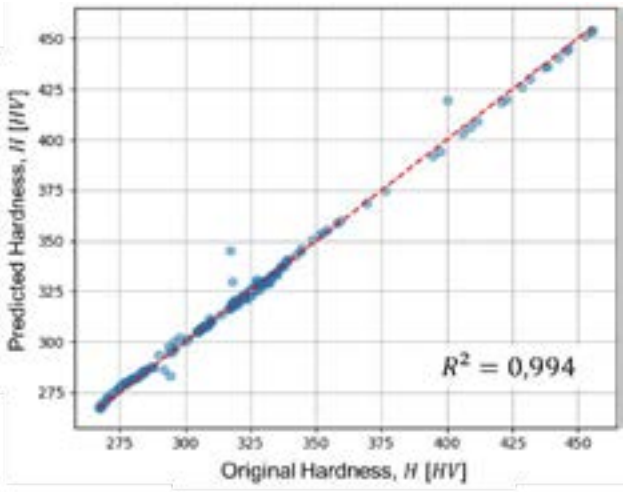


Figura 7 Predição da dureza em função do respectivo valor original.

A presença de alguns pontos ligeiramente afastados sugere ocorrências pontuais de maior erro, possivelmente associadas a regiões do espaço de parâmetros com menor densidade de dados no conjunto de treinamento ou a variabilidades inerentes ao processo de forjamento. No entanto, esses desvios são poucos e de pequena magnitude, como já evidenciado pelos baixos valores de MAE e MSE.

A Figura 8 mostra a análise da distribuição dos erros da Rede Neural Artificial (RNA) e revela um comportamento aproximadamente simétrico e centrado em torno de zero, o que é característico de um modelo bem ajustado. A elevada concentração de erros próximos de zero indica que, na maioria das previsões, as discrepâncias entre os valores previstos e os reais foram muito pequenas, confirmando a precisão e a consistência do modelo.

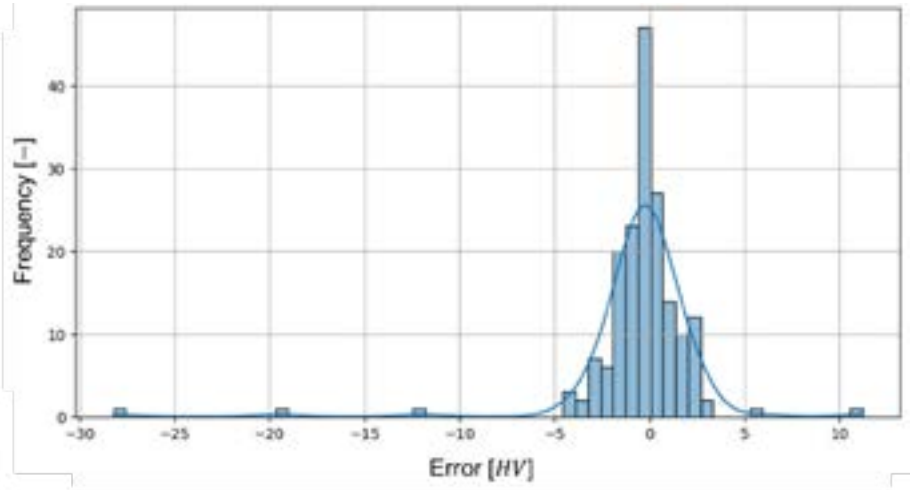


Figura 8 Análise da distribuição dos erros da RNA proposta.

A presença de uma curva suavizada com formato próximo ao de uma distribuição normal reforça a adequação do modelo ao problema, sugerindo que não há tendências sistemáticas de superestimação ou subestimação das previsões. Além disso, a ocorrência de poucos outliers, com erros mais expressivos situados nas extremidades, é natural em processos industriais, principalmente quando se considera a variabilidade intrínseca associada ao forjamento a quente e possíveis regiões de menor densidade no espaço de dados.

Os erros foram classificados em faixas de valor para quantificar sua frequência em diferentes intervalos, permitindo uma análise mais granular do comportamento do modelo. As faixas foram definidas como: < -10, -10 a -5, -5 a -2, -2 a 0, 0 a 2, 2 a 5, 5 a 10 e > 10. A Tabela 4 apresenta a distribuição dos erros de previsão por intervalo.

A baixa dispersão dos erros e a assimetria reduzida evidenciam a robustez do treinamento e a capacidade da arquitetura definida em generalizar bem para diferentes combinações de parâmetros termomecânicos. Esses resultados complementam as evidências fornecidas pelas métricas de avaliação e pelo coeficiente de determinação (R^2), confirmando a eficiência e a confiabilidade do modelo desenvolvido.

Tabela 4 Quantidade de valores encontrados por Grandeza de erro.

Grandeza do erro [HV]	Quantidade de valores encontrados
<-10	3
-10 a -5	0
-5 a -2	3
-2 a 0	70
0 a 2	84
2 a 5	16
5 a 10	2
>10	0

3.2 Comparação de Desempenho com Outros Modelos de Aprendizado de Máquina

A avaliação dos modelos alternativos revelou desempenhos satisfatórios, embora inferiores ao da Rede Neural Artificial, como mostra a Figura 9. A Máquina de Vetores de Suporte (SVM) apresentou um Erro Médio Absoluto (MAE) de 2,891 HV e um Erro Quadrático Médio (MSE) de 27,287 HV^2, com um Coeficiente de Determinação (R^2) de 0,984. Esses resultados indicam uma boa capacidade preditiva, porém com uma dispersão de erros relativamente maior, especialmente quando se considera o valor do MSE, que reflete maior sensibilidade a desvios mais expressivos.

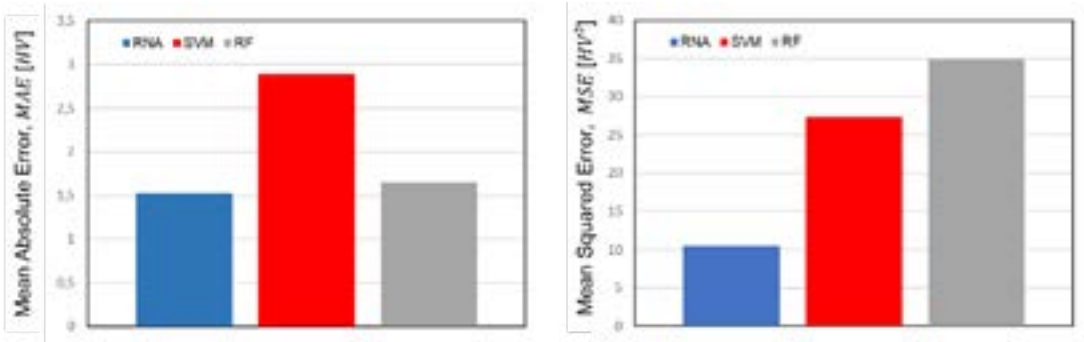


Figura 9 Comparação do desempenho dos modelos investigados com relação ao Erro Quadrático Médio (MSE) e ao Erro Médio Absoluto (MAE).

O modelo de Floresta Aleatória (Random Forest, RF), por sua vez, obteve um MAE de 1,654 HV e um MSE de 34,929 HV^2, com um R^2 de 0,980. Embora o erro médio absoluto tenha sido próximo ao da Rede Neural, o elevado MSE sugere maior ocorrência de erros extremos, que impactam negativamente a precisão global do modelo. Além disso, o R^2, embora elevado, foi o mais baixo entre os três modelos, indicando menor capacidade explicativa da variabilidade presente nos dados.

Embora tanto a SVM quanto a RF tenham se mostrado modelos adequados para a tarefa de predição da dureza em função dos parâmetros termomecânicos, a RNA se destacou como a opção mais eficiente e robusta, conciliando baixa margem de erro com elevada fidelidade preditiva, sendo, portanto, a mais indicada para aplicações que exigem altos níveis de confiabilidade e precisão.

A análise da relação entre os valores previstos e reais para os modelos de Máquina de Vetores de Suporte (SVM) e Floresta Aleatória (RF) (Figura 10) evidencia que ambos os métodos apresentaram um bom desempenho preditivo, com forte alinhamento dos pontos ao longo da linha de identidade (linha vermelha tracejada), que representa a correspondência ideal entre previsão e realidade. No entanto, observa-se que o modelo SVM apresenta uma maior dispersão dos pontos, especialmente na faixa superior das durezas, a partir de aproximadamente 375 HV. Nessa região, há uma tendência a subestimar os valores mais altos de dureza, com previsões mais afastadas da linha ideal. Esse comportamento contribui para o erro médio e quadrático mais elevados observados para a SVM, refletindo uma menor capacidade de generalização em comparação aos demais modelos, especialmente em extremos de dureza.

Por outro lado, o modelo de Floresta Aleatória (RF) apresentou uma distribuição mais concentrada dos pontos ao longo da linha de referência, com menores desvios sistemáticos. Embora existam alguns outliers isolados, principalmente na faixa intermediária e superior dos valores de dureza, a dispersão geral é menor que a observada na SVM, o que se reflete em um desempenho superior no Erro Médio Absoluto (MAE). Ainda assim, a maior sensibilidade a erros quadráticos, conforme evidenciado pelo MSE, indica que a RF apresentou dificuldades em controlar erros mais expressivos, possivelmente relacionados a combinações específicas de parâmetros termomecânicos com baixa representatividade no conjunto de dados.

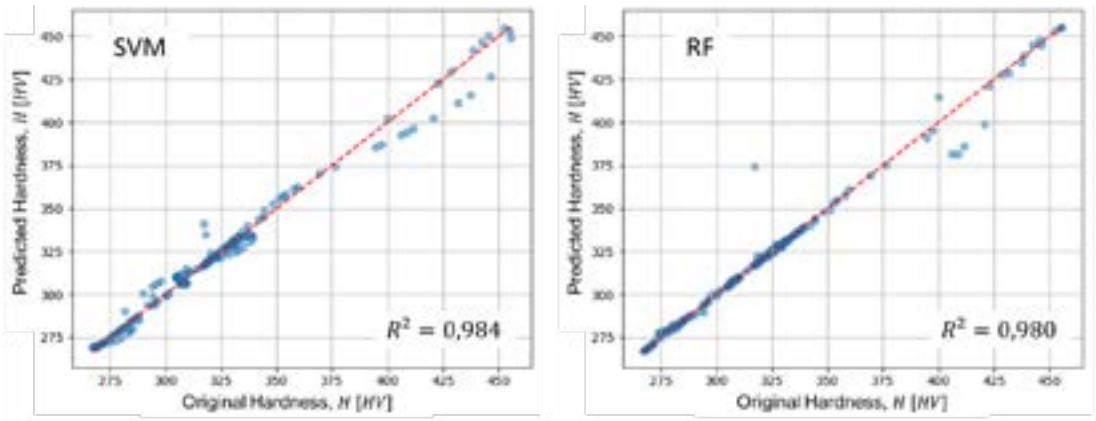


Figura 10 Predição da dureza em função do respectivo valor original para os modelos de SVM e RF.

O heatmap do erro absoluto por amostra (Figura 11) fornece uma visão comparativa detalhada da distribuição dos erros ao longo de todas as previsões realizadas pelos três modelos. Observa-se que a RNA apresenta, de maneira geral, uma distribuição mais homogênea dos erros, com a grande maioria das amostras associadas a baixos valores de erro absoluto, indicados pelas tonalidades mais escuras (roxo profundo). Apenas alguns poucos pontos isolados apresentam erros moderados, o que reforça a robustez e a estabilidade preditiva do modelo ao longo de diferentes regiões do espaço de entrada.

O modelo SVM, por sua vez, evidencia uma maior frequência de erros moderados ao longo de diversas amostras, com uma distribuição mais irregular e dispersa. As tonalidades mais claras indicam a presença de vários casos com erros mais elevados, o que corrobora a observação anterior de que a SVM apresentou maior sensibilidade a desvios e dificuldade em generalizar adequadamente, especialmente em regiões mais complexas do espaço de parâmetros.

Já a Floresta Aleatória (RF) apresenta um comportamento intermediário: embora a maior parte das amostras também esteja associada a erros baixos, há ocorrência de erros extremos, como destacado pela presença de uma faixa amarela intensa, correspondente a um erro superior a 50 HV em uma amostra específica. Essa ocorrência pontual, embora isolada, eleva significativamente o erro quadrático médio (MSE) do modelo, indicando uma vulnerabilidade a outliers ou a casos pouco representados no conjunto de treinamento.

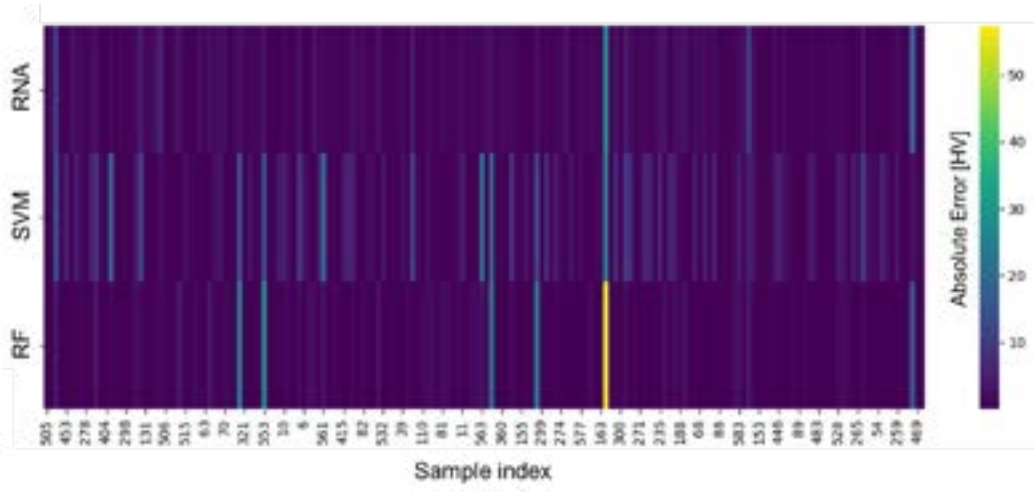


Figura 11 Heatmap do erro absoluto por amostra.

De modo geral, o heatmap reforça a superioridade da RNA na tarefa de predição da dureza, apresentando menor variabilidade nos erros e maior consistência em comparação com os outros modelos. Além disso, evidencia que, embora tanto a SVM quanto a RF sejam capazes de realizar previsões aceitáveis, ambas apresentam fragilidades específicas: a SVM com maior dispersão de erros e a RF com sensibilidade a outliers extremos.

A complexidade computacional é um fator crucial na escolha do modelo mais adequado, especialmente quando se considera a aplicação prática em ambientes industriais ou de pesquisa. No presente estudo, a Rede Neural Artificial (RNA) demandou um maior tempo de treinamento, totalizando aproximadamente 1 minuto e 25 segundos. Esse tempo mais elevado está diretamente relacionado à complexidade da arquitetura adotada, com múltiplas camadas e um número significativo de neurônios, além da necessidade de ajustes iterativos intensivos para a otimização dos pesos e minimização da função de perda.

Contudo, esse maior custo computacional é compensado pela alta acurácia do modelo, que apresentou o melhor desempenho preditivo entre as abordagens testadas, tanto em termos de baixa margem de erro quanto de elevada capacidade explicativa. Assim, a RNA se justifica plenamente em contextos onde a precisão é crítica, e o tempo de treinamento não é um fator limitante.

Por outro lado, os modelos de Máquina de Vetores de Suporte (SVM) e Floresta Aleatória (RF) apresentaram tempos de treinamento significativamente menores, de aproximadamente 10 segundos e 30 segundos, respectivamente. Essa eficiência computacional torna essas técnicas vantajosas em situações onde a rapidez na obtenção do modelo é essencial, ou quando os recursos computacionais são limitados.

Entretanto, essa rapidez é acompanhada por um desempenho inferior em relação à RNA, com maiores erros médios e quadráticos, além de menor capacidade de generalização. Assim, a escolha entre os modelos envolve um trade-off clássico entre tempo computacional e desempenho preditivo: enquanto a RNA oferece maior precisão a um custo computacional mais elevado, a SVM e a RF possibilitam soluções mais rápidas, porém menos precisas.

Esse balanço deve ser cuidadosamente considerado conforme as demandas específicas da aplicação: se o objetivo for máxima precisão e robustez, a RNA se destaca; se, por outro lado, for necessária uma implementação rápida com precisão aceitável, SVM e RF podem ser alternativas viáveis.

3.3 Testes de Inferência

A fim de validar a capacidade de generalização e robustez dos modelos desenvolvidos, foram realizados testes de inferência utilizando dados que não participaram do treinamento ou validação prévia. O desempenho dos modelos foi analisado por meio da comparação direta das previsões com os valores reais de dureza de bielas forjadas, bem como pela avaliação das distribuições dos desvios em relação aos valores esperados.

A Figura 12 apresenta a comparação entre os 10 primeiros valores previstos e os valores reais. Observa-se que, de modo geral, todos os modelos — Rede Neural Artificial (RNA), Máquina de Vetores de Suporte (SVM) e Floresta Aleatória (RF) — conseguiram aproximar-se dos valores reais com razoável precisão. Entretanto, nota-se que a RNA mantém uma maior regularidade, com previsões sistematicamente mais próximas dos valores reais em comparação aos demais métodos, enquanto a SVM e a RF apresentam desvios mais visíveis em algumas amostras, especialmente em casos de valores de dureza mais elevados.

A análise da distribuição dos desvios foi realizada através de dois métodos complementares: o boxplot (Figura 13) e o violin plot (Figura 14). O boxplot evidencia que a RNA possui uma dispersão menor dos desvios em relação aos demais modelos, com a maioria dos erros concentrados próximos de zero e poucos outliers de baixa magnitude. Em contrapartida, tanto a SVM quanto a RF apresentam distribuições mais amplas, com maior número de outliers e desvios mais acentuados, especialmente no caso da SVM, onde se observam erros sistematicamente mais elevados em alguns casos.

O violin plot complementa essa análise ao ilustrar a densidade das distribuições dos desvios para cada modelo. A RNA apresenta uma distribuição mais estreita e concentrada, reforçando sua capacidade de produzir previsões com menor variabilidade e maior precisão. Por outro lado, a SVM e a RF exibem distribuições mais largas, indicando uma maior variabilidade dos erros e maior propensão a desvios significativos, principalmente nas extremidades, com casos isolados de erros elevados.

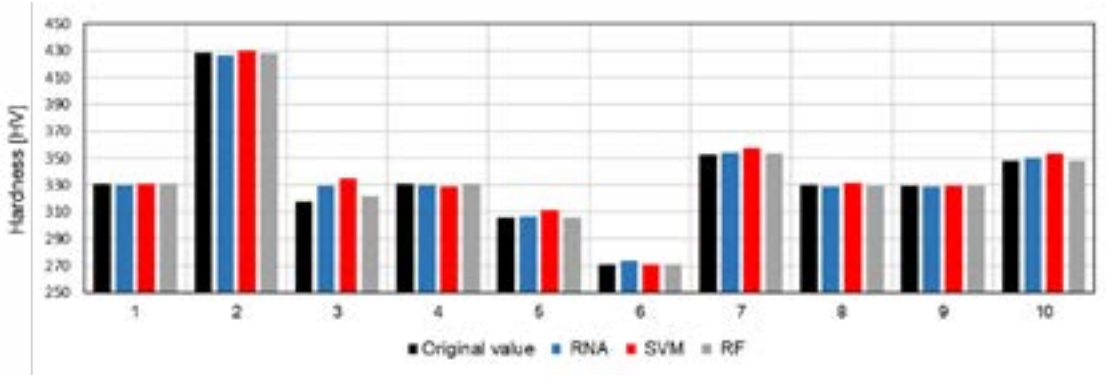


Figura 12 Comparação entre valores previstos e os valores reais dos modelos analisados.

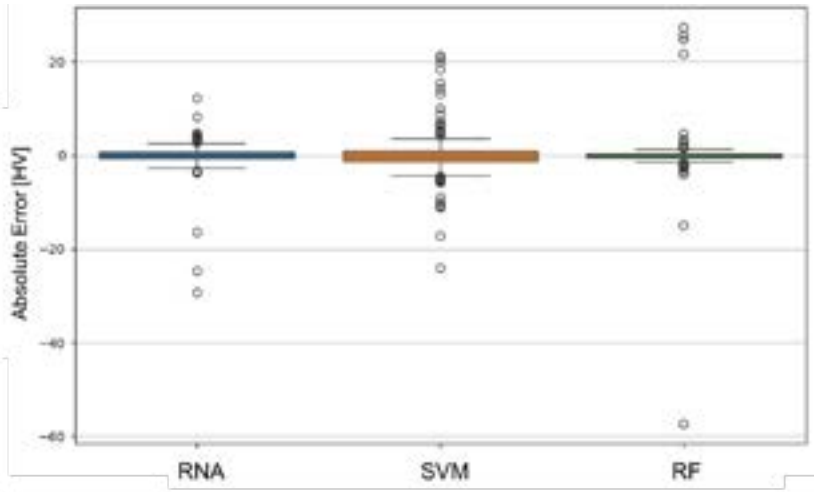


Figura 13 Análise da distribuição dos desvios através do boxplot.

Esses resultados demonstram, de forma consistente com as análises anteriores, que a Rede Neural Artificial oferece a melhor performance preditiva, combinando baixa variabilidade, reduzida incidência de outliers e menores desvios médios em relação aos valores reais. A SVM, apesar de eficiente, mostra-se mais sensível a erros em alguns cenários, enquanto a Floresta Aleatória tende a apresentar erros mais dispersos e, ocasionalmente, desvios extremos, como evidenciado pelos outliers identificados.

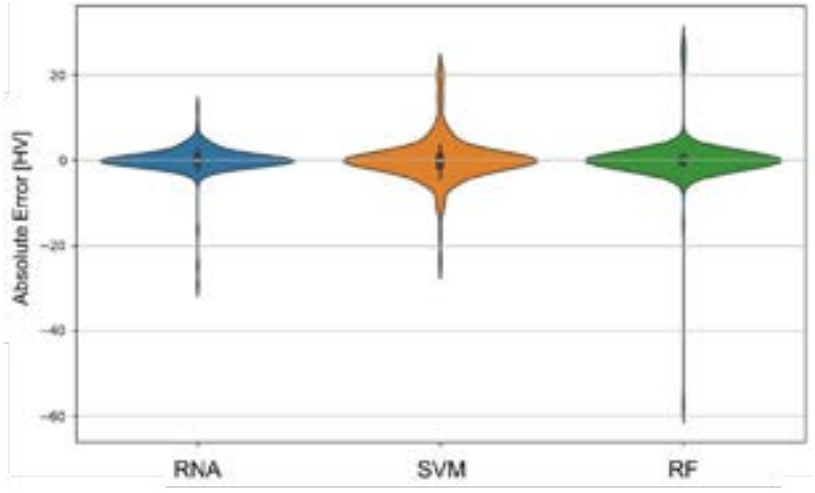


Figura 14 Análise da distribuição dos desvios através do violin plot.

4. CONCLUSÕES

Este estudo investigou a viabilidade e a eficácia da aplicação de técnicas de inteligência artificial na predição da dureza de aços bainíticos forjados, com base em parâmetros termomecânicos obtidos a partir de dados experimentais e simulações numéricas.

A Rede Neural Artificial (RNA), com arquitetura composta por três camadas ocultas (64, 128 e 256 neurônios), apresentou o melhor desempenho preditivo, alcançando um Erro Médio Absoluto (MAE) de 1,3518 HV, um Erro Quadrático Médio (MSE) de 8,8448 HV² e um Coeficiente de Determinação (R^2) de 0,994.

Os modelos alternativos, Máquina de Vetores de Suporte (SVM) e Floresta Aleatória (RF), embora apresentem vantagens em termos de menor tempo de treinamento, mostraram desempenho inferior, com maiores erros médios e quadráticos e menor capacidade explicativa dos dados.

Os testes de inferência, realizados com dados provenientes do forjamento de bielas, validaram a robustez e aplicabilidade prática do modelo desenvolvido, demonstrando que a RNA manteve um desempenho superior mesmo quando exposta a cenários distintos dos utilizados para treinamento.

Os resultados obtidos neste estudo representam uma contribuição relevante para o projeto e controle inteligente de processos de forjamento de aços bainíticos, demonstrando o potencial das técnicas de aprendizado de máquina como ferramentas eficazes de apoio à tomada de decisão e ao ajuste dinâmico de processos industriais. O modelo desenvolvido pode ser utilizado para auxiliar engenheiros na definição dos parâmetros termomecânicos ideais durante o projeto do processo, proporcionando uma base preditiva robusta para a otimização das condições operacionais. Além disso, sua aplicação direta no controle em tempo real do processo de forjamento permite a identificação precoce de inconsistências produtivas e a implementação ágil de correções, contribuindo para a melhoria contínua da qualidade e eficiência.

Nesse contexto, destaca-se ainda a possibilidade de ampliar o banco de dados utilizado, incorporando dados reais provenientes da produção, o que permitirá que os modelos se tornem ainda mais precisos e adaptados às condições específicas de operação, promovendo uma evolução contínua da capacidade preditiva e da robustez das soluções baseadas em inteligência artificial no setor de conformação mecânica.

REFERÊNCIAS

[1] HUI W., ZHANG Y., ZHAO X., XIAO N. HU F., High cycle fatigue behavior of V-microalloyed medium carbon steels: A comparison between bainitic and ferritic-pearlitic microstructures, International Journal of Fatigue, 2016.

[2] BUCHMAYR B., Critical Assessment 22: bainitic forging steels, Materials Science and Technology, 2016.

[3] GRAMLICH A., LANGE R., ZITZ U., BÜßENSCHÜTT K., Air-Hardening Die-Forged Con-Rods—Achievable Mechanical Properties of Bainitic and Martensitic Concepts, Metals, 2022.

[4] WIRTHS W., WAGENER R., BLECK W., MELZ, T., Bainitic Forging Steels for Cyclic Loading. Adv. Mat. Res., 2014.

[5] H.-S. Park, T.-V. Anh, Optimization of Bending Sequence in Roll Forming Using Neural Network and Genetic Algorithm Journal of Mechanical Science and Technology, 25 (2011), pp. 2127-2136

[6] C. Hartmann, D. Opritescu, W. Volk, An Artificial Neural Network Approach for Tool Path Generation in Incremental Sheet Metal Free-Forming, Journal of Intelligent Manufacturing, 30 (2) (2019), pp. 757-770.

[7] R. Di Lorenzo, G. Ingarao, F. Micari, On the Use of Artificial Intelligence Tools for Fracture Forecast in Cold Forming Operations, Journal of Materials Processing Technology, 177 (1-3) (2006), pp. 315-318
[8] D.D. Stoerkle, P. Seim, L. Thyssen, B. Kuhlenkoetter, Machine Learning in Incremental Sheet Forming, Proceedings of ISR 2016: 47st International Symposium on Robotics, VDE (2016), pp. 1-7.
[9] M.A. Yatkın, M. Kõrgesaar, Machine Learning Enabled Identification of Sheet Metal Localization, International Journal of Solids and Structures, 288 (2024), Article 112592
[10] S. Di, P.F. Thomson, Neural Network Approach for Prediction of Wrinkling Limit in Square Metal Sheet Under Diagonal Tension Journal of Testing and Evaluation, 25 (1) (1997), pp. 74-81
[11] SPATHOPOULOS S.C., STAVROULAKIS G.E., Springback Prediction in Sheet Metal Forming, Based on Finite Element Analysis and Artificial Neural Network Approach, Appl. Mech., 2020.
[12] C. Jaremenko, N. Ravikumar, E. Affronti, M. Merklein, A. Maier, Determination of forming limits in sheet metal forming using deep learning, Materials, 12 (7) (2019), p. 1051
[13] Derogar, A., & Djavanroodi, F. (2011). Artificial Neural Network Modeling of Forming Limit Diagram. Materials and Manufacturing Processes, 26(11), 1415–1422. https://doi.org/10.1080/10426914.2010.544818
[14] M. Mozaffar, R. Bostanabad, W. Chen, K. Ehmann, J. Cao, M. Bessa. Deep Learning Predicts Path-Dependent Plasticity, Proceedings of the National Academy of Sciences, 116 (52) (2019), pp. 26414-26420
[15] Rosiak, A., Schmeling, M., Marcelino, R. et al. Machine learning applied to predict the flow curve of steel alloys. Int J Adv Manuf Technol 134, 5481–5492 (2024). https://doi.org/10.1007/s00170-024-14472-0
[16] CHEN, L. et al. Hybrid deep learning model for simultaneous prediction of hardness and grain size in titanium alloys. Materials & Design, 2021.
[17] WANG, H. et al. Prediction of Vickers hardness in aluminum alloys using artificial neural networks. Journal of Materials Processing Technology, 2020.
[18] D. Wu, C. Jennings, J. Terpenny, R.X. Gao, S. Kumara, A Comparative Study On Machine Learning Algorithms for Smart Manufacturing: Tool Wear Prediction Using Random Forests, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 139 (7) (2017)
[19] MRZYGŁÓD B., HAWRYLUK M., JANIK M., OLEJARCZYK-WOŻEŃSKA I., Sensitivity analysis of the artificial neural networks in a system for durability prediction of forging tools to forgings made of C45 steel, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020
[20] WANG, J.; Li, Y.; Zhao, R.; Gao, R. Physics guided neural network for machining tool wear prediction. 2020.
[21] ROSIAK, André; DE LUCCA DE COSTA, Luana; GOMES DOS SANTOS, Thomas; SCHAEFFER, Lirio. Analysis of Hot Forging of a Bainitic Steel Hardened by Continuous Cooling Using Wedge Test. JMEPEG, 2025. https://doi.org/10.1007/s11665-025-11091-y.
[22] CAO, Jian et al. Artificial intelligence in metal forming. CIRP Annals, v. 73, n. 2, p. 561-587, 2024.
[23] Pelt, D.M.; Sethian, J.A. A mixed-scale dense convolutional neural network for image analysis. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 2018, 115, 254–259.
[24] DIETER, G. E., KUHN, H. A., SEMIATIN, S. L.,Handbook of Workability and Process Design, ASM International, 2003.
[25] Agrawal, A.; Deshpande, P.D. Exploration of data science techniques to predict fatigue strength of steel from composition and processing parameters. Integr. Mater. Manuf. Innov. 2014, 3, 90–108.
[26] Wang, Y.; Wu, X.; Li, X.; Xie, Z.; Liu, R.; Liu, W.; Zhang, Y.; Xu, Y.; Liu, C. Prediction and Analysis of Tensile Properties of Austenitic Stainless Steel Using Artificial Neural Network. Metals 2020, 10, 234. https://doi.org/10.3390/met10020234
[27] OKEWU, Emmanuel; MISRA, Sanjay; FERNANDEZ-SANZ, Lius. Parameter Tuning Using Adaptive Moment Estimation in Deep Learning Neural Networks. In: Computational Science and Its Applications – ICCSA 2020. Conference paper, p. 261-272. Publicado online em 30 set. 2020.
[28] WANG, Ling; MU, Zhichun; GUO, Hui. Application of support vector machine in the prediction of mechanical property of steel materials. Journal of University of Science and Technology Beijing, Mineral, Metallurgy, Material, v. 13, n. 6, p. 512-515, 2006. https://doi.org/10.1016/S1005-8850(06)60104-7.
[29] LU, Wen-Cong; JI, Xiao-Bo; LI, Min-Jie; LIU, Liang; YUE, Bao-Hua; ZHANG, Liang-Miao. Using support vector machine for materials design. Advances in Manufacturing, v. 1, p. 151-159, 2013.
[30] YAN, Cheng; SHEN, Xiuli; GUO, Fushui; ZHAO, Shiqi; ZHANG, Lizhang. A novel model modification method for support vector regression based on radial basis functions. Structural and Multidisciplinary Optimization, v. 60, p. 983-997, 2019.
[31] BROWN, Tom et al. Language models are few-shot learners. Advances in neural information processing systems, 2020.
[32] SMITH, Shaden et al. Using deepspeed and megatron to train megatron-turing nlg 530b, a large-scale generative language model., 2022.
[33] KWAK, Seungmi; KIM, Jaehwang; DING, Hongsheng; XU, Xuesong; CHEN, Ruirun; GUO, Jingjie; FU, Hengzhi. Machine learning prediction of the mechanical properties of γ-TiAl alloys

produced using random forest regression model. Journal of Materials Research and Technology, v. 18, p. 520-530, 2022.

[34] SCHUBERT, M.; LUKOVIĆ, M.; CHRISTEN, H. Prediction of mechanical properties of wood fiber insulation boards as a function of machine and process parameters by random forest. Wood Science and Technology, v. 54, p. 703-713, 2020.

[35] AKBARI, Parand; ZAMANI, Masoud; MOSTAFAEI, Amir. Machine learning prediction of mechanical properties in metal additive manufacturing. Additive Manufacturing, v. 91, 104320, 5 jul. 2024. https://doi.org/10.1016/j.addma.2024.104320.

[36] Merayo, D.; Rodríguez-Prieto, A.; Camacho, A. Prediction of Physical and Mechanical Properties for Metallic Materials Selection Using Big Data and Artificial Neural Networks. IEEE Access 2020, 8, 13444–13456.

44º SENAFOR

28ª Conferência Internacional de Forjamento - Brasil
14ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas / 11º Congresso do BrDDRG
14ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis
3ª Conferência Internacional de Inovação em Materiais e Manufatura
Porto Alegre, RS, dias 1, 2 e 3 de outubro de 2025
www.senafor.com

INVESTIGAÇÃO DO FORJAMENTO A MORNO DO AÇO MICROLIGADO AO VANÁDIO DIN 30MnVS6

André Rosiak [1]
Vicente Martin Biason [2]
Helena Bonow Silveira [3]
Marina Barletta Sommer [4]
Lirio Schaeffer [5]

ABSTRACT

Este trabalho investigou os efeitos da temperatura e do nível de deformação no forjamento a morno do aço microligado ao vanádio DIN 30MnVS6. Foram realizados ensaios de forjabilidade em quatro temperaturas (600 °C, 700 °C, 800 °C e 900 °C), com posterior caracterização microestrutural, avaliação de dureza, análise da rugosidade superficial e simulação numérica do processo. Os resultados mostraram que o aumento da temperatura favorece mecanismos termicamente ativados, como recristalização dinâmica, reduzindo as forças de conformação e refinando a microestrutura. Por outro lado, temperaturas intermediárias (600 °C e 700 °C) proporcionaram maior endurecimento por deformação e melhor acabamento superficial, associado a menor oxidação. O estudo comprova a viabilidade do forjamento a morno para o aço 30MnVS6, destacando seu potencial para a produção de peças forjadas de alta resistência e qualidade superficial, sem a necessidade de tratamentos térmicos adicionais.
Palavras-chave: Forjamento a morno; Aço microligado; DIN 30MnVS6.

1. INTRODUÇÃO

As crescentes pressões econômicas e ambientais por processos mais sustentáveis e competitivos têm impulsionado a indústria de manufatura a buscar soluções inovadoras. Nesse cenário, o desenvolvimento de novos conceitos de aços e processos de forjamento capazes de conferir propriedades aprimoradas sem a necessidade de tratamentos térmicos onerosos tem se mostrado promissor para a redução de custos e emissões [1-6].

Apesar dos avanços significativos em pesquisa e desenvolvimento nessa área, uma alternativa tecnicamente atrativa tem sido pouco explorada: o forjamento a morno. Essa tecnologia representa um ponto de equilíbrio entre o forjamento a quente e a frio, ao aliar a boa conformabilidade do primeiro com a maior precisão dimensional e as excelentes propriedades mecânicas do segundo. Assim, o forjamento a morno desponta como uma alternativa estratégica para a indústria, com grande potencial de contribuir para a eficiência e a sustentabilidade dos processos de fabricação [7].

Apesar do grande potencial do forjamento a morno, sua adoção ainda enfrenta desafios significativos, sobretudo devido à escassez de dados quantitativos consolidados e à variabilidade dos parâmetros de processo. Em razão disso, muitas empresas tendem a priorizar rotas já consolidadas nas fases iniciais de desenvolvimento de produtos, favorecendo alternativas com maior previsibilidade econômica e menor risco tecnológico. No entanto, uma vez que o forjamento a morno é devidamente estabelecido para uma aplicação específica, ele tende a se consolidar como a rota preferencial de fabricação — especialmente em contextos que demandam a combinação entre elevado desempenho mecânico, alta precisão dimensional e viabilidade econômica.

As ligas de aço tipicamente empregadas no forjamento a morno incluem aços ao carbono e aços ligados Cr-Ni, Cr-Mn e Cr-Mo [7]. A aplicação de outras classes de aço nesse processo ainda permanece pouco explorada. Entre as alternativas com potencial promissor, destacam-se os aços microligados de médio carbono, que reúnem características favoráveis ao desempenho mecânico e à racionalização do processamento termomecânico.

Os aços microligados de médio carbono são amplamente utilizados no forjamento a quente devido a possibilidade de obtenção de componentes com propriedades mecânicas elevadas por meio de uma rota de processamento termomecânico simplificada. As propriedades finais das peças — comparáveis às de aços convencionalmente temperados e revenidos — são alcançadas através do resfriamento controlado a partir das temperaturas de conformação a quente [8,9]. O aumento da resistência mecânica é obtido, principalmente, por meio da elevação da fração volumétrica de perlita, do refino de grão e do endurecimento por precipitação na matriz ferrítica. O refino de grão é promovido por adições controladas de microligantes como alumínio (Al), nióbio (Nb) ou titânio (Ti), enquanto o endurecimento por precipitação é intensificado pela adição de vanádio (V). Este último favorece a formação de partículas finas de carbonitretos de vanádio V(CN) na ferrita durante o resfriamento após a conformação. Estima-se que cada incremento de 0,01% em peso de vanádio pode resultar em um aumento de 5 a 15 MPa na resistência, a depender do teor de carbono e da taxa de resfriamento adotada [10].

Neste estudo, o efeito do forjamento a morno sobre a microestrutura e a dureza do aço microligado ao vanádio DIN 30MnVS6 é investigado. Ensaios de forjabilidade foram conduzidos com o objetivo de compreender o efeito combinado da temperatura de forjamento e do nível de deformação nas características do material.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A análise do efeito do forjamento a morno no aço DIN 30MnVS6 foi precedida por uma caracterização detalhada do material em sua condição de fornecimento. Inicialmente, realizou-se a análise microestrutural por meio de microscopia óptica, utilizando técnicas metalográficas convencionais. Para a avaliação da dureza, foram realizados ensaios de microdureza com o auxílio de um microdurômetro modelo Hardness Tester ISH-TDV 1000, da marca INSIDE. A caracterização química do aço foi conduzida com o uso de um espectrômetro de emissão óptica por centelhamento, modelo Q2ION, da fabricante BRUKER. Os resultados da composição química,

expressos em percentual em massa, encontram-se apresentados na Tabela 1, estando em conformidade com as faixas nominais reportadas na literatura [11].

Tabela 1. Resultado da análise química do aço DIN 30MnVS6 (% em massa).

Elemento	C	Si	Mn	P	S	V
% massa	0,262	0,484	1,210	0,024	0,020	0,111

A Figura 1 apresenta, de forma esquemática, o procedimento adotado nos ensaios de forjabilidade. Os testes consistiram na compressão de corpos de prova cilíndricos entre matrizes planas. Para cada ensaio, os corpos de prova foram inicialmente aquecidos em forno resistivo até a temperatura de forjamento e, em seguida, transferidos para uma prensa hidráulica da marca EKA, com velocidade de 15mm/s e capacidade de 40t, onde o processo de deformação foi realizado. As matrizes planas foram previamente aquecidas a 150 °C e recobertas com lubrificante à base de grafite, a fim de reduzir o atrito durante o forjamento.

A Tabela 2 resume os parâmetros empregados nos ensaios de forjabilidade. Foram avaliadas diferentes temperaturas de forjamento: 600 °C, 700 °C, 800 °C e 900 °C. Além disso, as amostras foram submetidas a dois níveis de deformação. Considerou-se como altura inicial h_0 o valor igual ao diâmetro da amostra, de 16,5 mm.

Durante os ensaios de forjamento, foi realizada a aquisição de dados de força e deslocamento da prensa. A ferramenta inferior é montada sobre uma célula de carga, para medição da força de conformação. Para o registro do sinal de carga, um modulo de aquisição de dados analógicos (HBM© - SPIDER 8®) e o software CATMAN® foram utilizados. Dados referentes ao deslocamento da matriz superior são obtidas a partir de um LVDT.

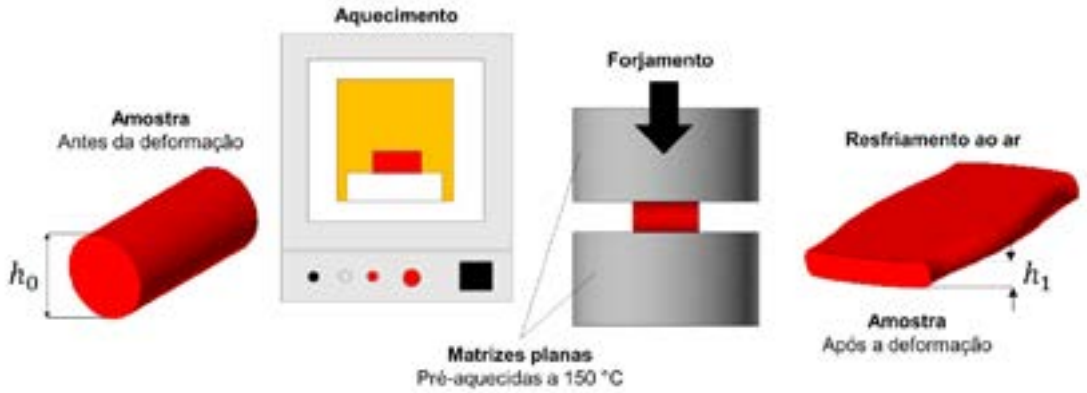


Figura 1. Desenho esquemático dos ensaios de forjabilidade a morno.

Tabela 2. Parâmetros dos ensaios de forjabilidade a morno do DIN 30MnVS6.

Temperatura (T)	Reduções em altura, Δh [%]
600°C	35
	40
700°C	35
	45
800°C	35
	55
900°C	35
	55

As amostras forjadas foram seccionadas transversalmente para a realização da análise microestrutural e para a construção do perfil de microdureza ao longo da seção. Devido ao atrito nas superfícies de contato durante a compressão, ocorre o fenômeno de embarrilamento, que resulta em uma distribuição heterogênea da deformação na seção transversal da amostra. A determinação do perfil de dureza

nesta região permite correlacionar os diferentes níveis de deformação plástica com as variações locais de dureza, fornecendo uma visão detalhada dos efeitos mecânicos induzidos pelo forjamento a morno

Com o objetivo de avaliar o efeito da temperatura de forjamento a morno na qualidade superficial das peças, as amostras forjadas também foram submetidas à medição de rugosidade superficial. As avaliações foram realizadas utilizando um rugosímetro portátil Mitutoyo SJ-310, conforme os parâmetros definidos pela norma NBR ISO 4287:2002.

A análise inversa do procedimento experimental foi conduzida por meio de simulações tridimensionais utilizando o software QForm UK, com base no método dos elementos finitos. Para assegurar a confiabilidade dos resultados numéricos, foi realizada uma etapa de validação comparando-se a largura máxima da amostra, medida na região da meia-altura, obtida experimentalmente e numericamente ao final do processo. Essa comparação permite avaliar a acurácia do modelo numérico, especialmente no que se refere à previsão dos níveis de deformação plástica [12].

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 2 apresenta a microestrutura do aço microligado ao vanádio DIN 30MnVS6 na condição inicial. A microestrutura é caracterizada por grãos equiaxiais de ferrita e colônias dispersas de perlita. Essa configuração microestrutural confere ao material uma dureza média 248 HV.

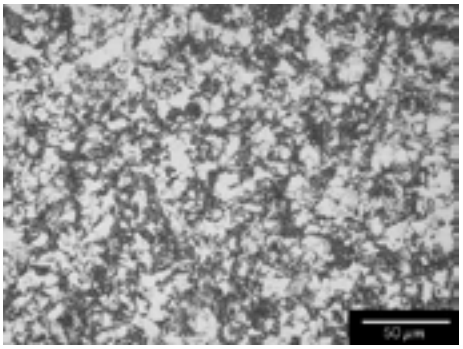
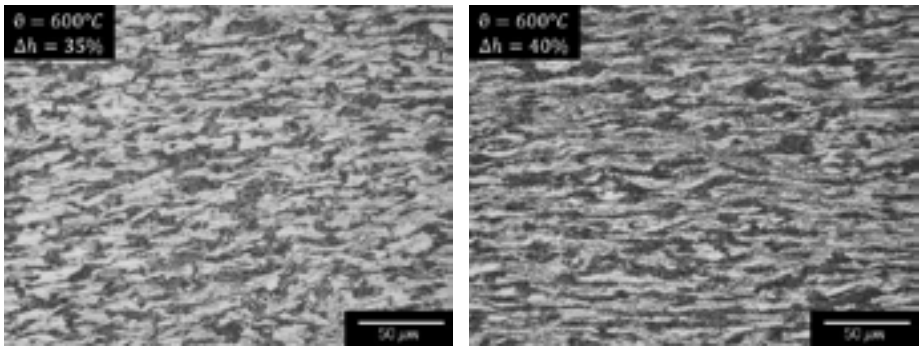


Figura 2 Microestrutura do aço DIN 30MnVS6 na condição inicial.

As Figuras 3, 4, 5 e 6 apresentam a microestrutura do aço microligado DIN 30MnVS6 após deformação nas temperaturas de 600 °C, 700 °C, 800 °C e 900 °C, respectivamente. Nas temperaturas de 600 °C e 700 °C, o aquecimento não é suficiente para induzir transformação de fase no material. Como consequência, a deformação plástica resulta no alinhamento da microestrutura ferrita-perlita na direção da deformação, com os grãos equiaxiais de ferrita sendo progressivamente achatados e alongados. As colônias de perlita, por sua maior resistência, sofrem deformação em menor grau.

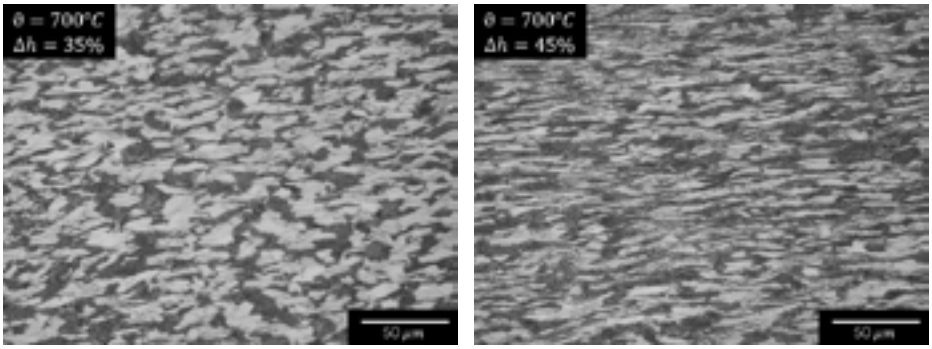
O aumento da temperatura de aquecimento de 600 °C para 700 °C resulta em um discreto crescimento dos grãos de ferrita, observado em ambos os níveis de deformação analisados. Além disso, o aumento da deformação promove maior alongamento dos grãos de ferrita em ambas as temperaturas de forjamento, evidenciando o efeito combinado da temperatura e da deformação plástica na evolução microestrutural.

O aquecimento a 800 °C conduz o material ao campo bifásico (α + γ), no qual uma fração da microestrutura sofre austenitização. Como resultado, ocorrem transformações de fase durante o resfriamento subsequente. Além disso, o aumento da temperatura de forjamento favorece o desenvolvimento de fenômenos termicamente ativados, como a recristalização dinâmica, que contribui para o refinamento microestrutural.



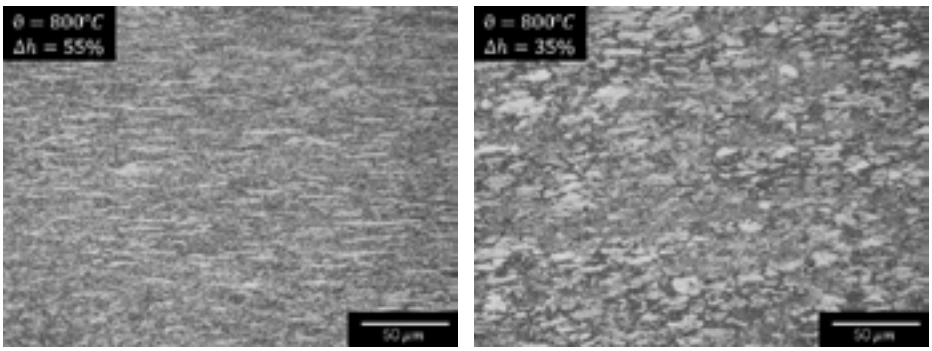
(a) (b)

Figura 3 Microestrutura do aço DIN 30MnVS6 forjado a 600°C.



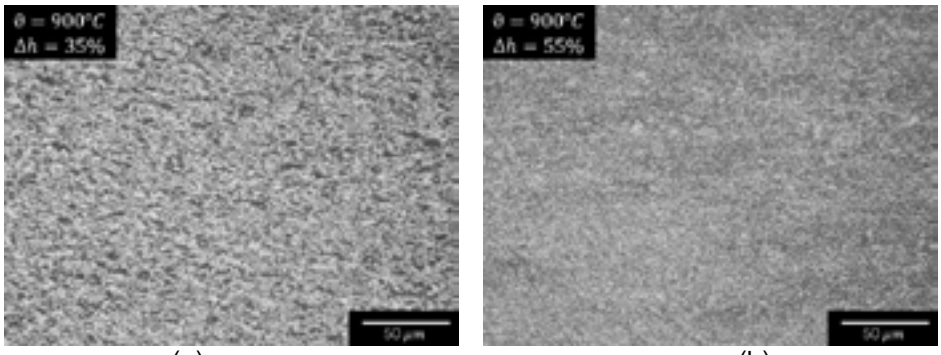
(a) (b)

Figura 4 Microestrutura do aço DIN 30MnVS6 forjado a 700°C.



(a) (b)

Figura 5 Microestrutura do aço DIN 30MnVS6 forjado a 800°C.



(a) (b)

Figura 6 Microestrutura do aço DIN 30MnVS6 forjado a 900°C.

No forjamento a 800 °C, uma redução de 35% na altura promove a formação de uma matriz composta por grãos de ferrita recristalizados, levemente alongados, e

colônias de perlita. Com o aumento da deformação para uma redução de altura de 55%, os grãos de ferrita recristalizados apresentam maior alongamento em razão do incremento da deformação. A microestrutura resultante apresenta morfologia semelhante à observada nas temperaturas de 600 °C e 700 °C, porém com um refinamento microestrutural significativamente superior.

O aquecimento a 900 °C promove a completa austenitização do material, resultando na transformação integral da microestrutura após o processamento termomecânico. A combinação entre a transformação de fase e a recristalização dinâmica ocorrida durante o forjamento gera uma microestrutura composta por grãos equiaxiais de ferrita extremamente refinados, acompanhados por colônias de perlita igualmente finas. O aumento da deformação para uma redução de altura de 55% intensifica o processo de recristalização, promovendo um refinamento microestrutural ainda mais acentuado.

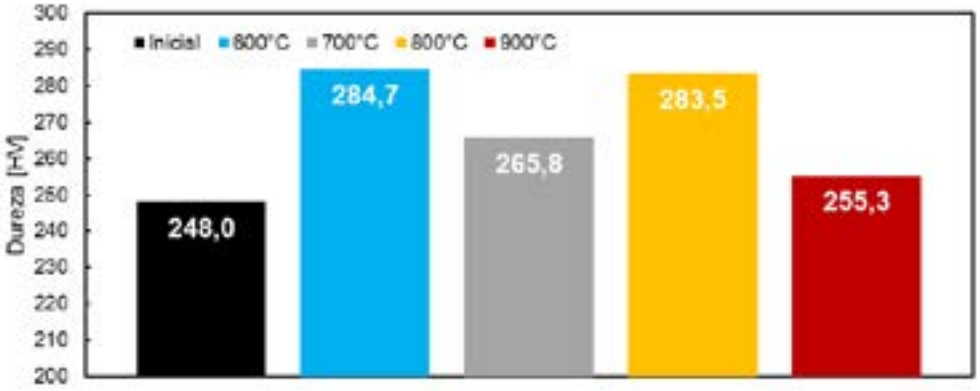


Figura 7 Dureza média das amostras submetidas a 35% de redução em altura.

A Figura 7 apresenta os valores de dureza das amostras submetidas a uma redução de 35% em altura nas diferentes temperaturas analisadas. As amostras deformadas a 600 °C e 800 °C exibem as maiores durezas médias, com 284,7 HV e 283,5 HV, respectivamente. Em relação a condição inicial, o forjamento nestas condições gerou um incremento de dureza de cerca de 15%.

A amostra processada a 900 °C apresenta a menor dureza média entre as condições avaliadas. Embora apresente microestrutura refinada devido à recristalização dinâmica, uma possível redução na fração volumétrica de perlita após a transformação de fase induzida termomecanicamente, pode justificar o valor de dureza inferior observado.

A dureza da amostra processada a 700 °C pode estar relacionada ao crescimento dos grãos de ferrita. As condições termomecânicas nesta temperatura parecem ser suficientes para promover o engrossamento microestrutural, mas insuficientes para desencadear a recristalização.

A Figura 8 apresenta os resultados numéricos da distribuição da deformação equivalente nas amostras submetidas a diferentes níveis de redução de altura. Em todas as condições analisadas, observa-se um padrão semelhante de distribuição, com menores níveis de deformação na periferia e valores crescentes em direção ao centro da amostra. Como era esperado, o aumento da redução de altura resulta em maior magnitude de deformação acumulada.

Na Figura 9, os dados numéricos de deformação equivalente são correlacionados com os perfis de dureza das amostras forjadas. De modo geral, todas as condições analisadas apresentam comportamento semelhante, com aumento da dureza em função do nível de deformação. No entanto, a forma como esse aumento de dureza ocorre varia entre as diferentes condições avaliadas.

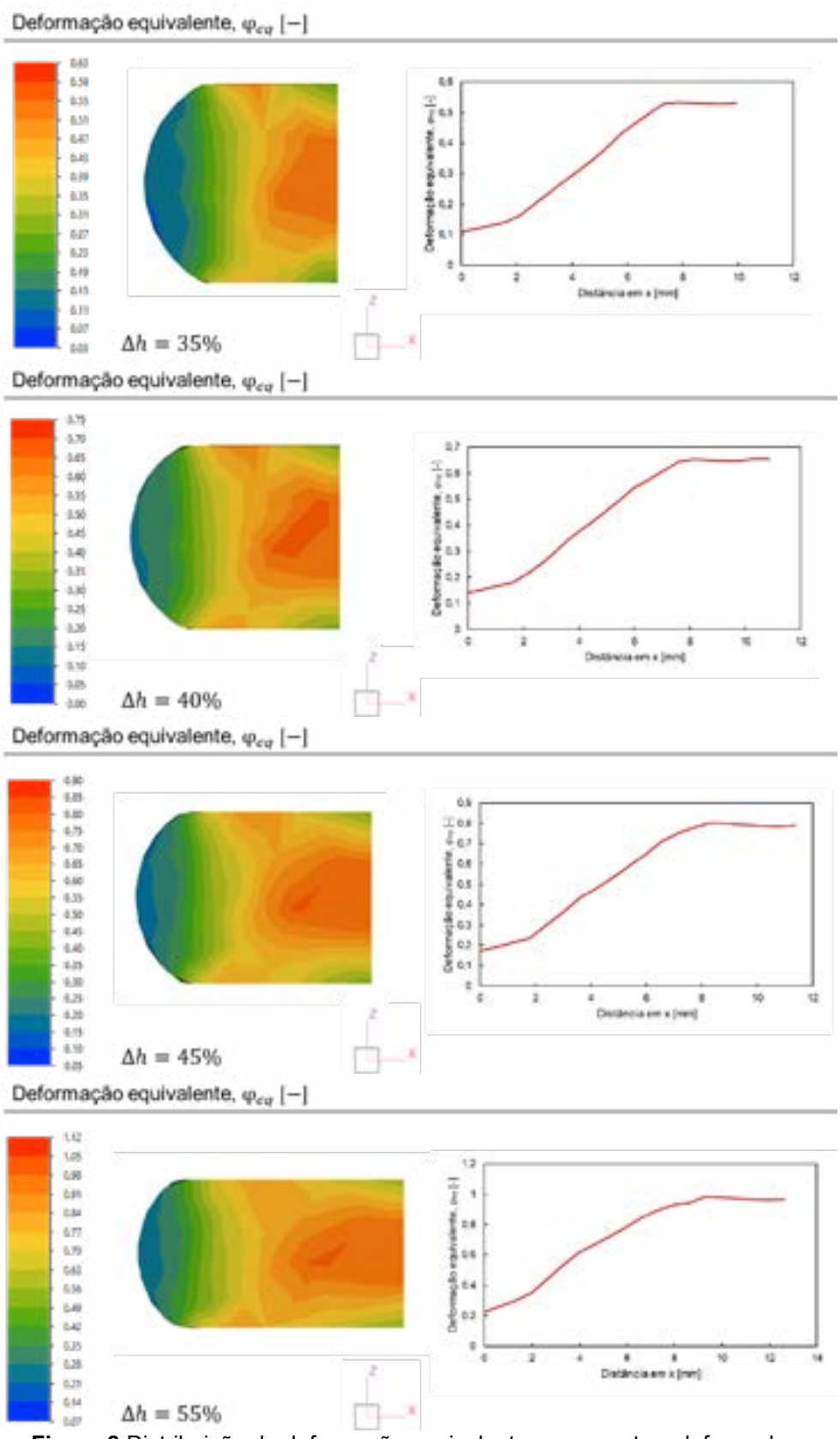


Figura 8 Distribuição da deformação equivalente nas amostras deformadas.

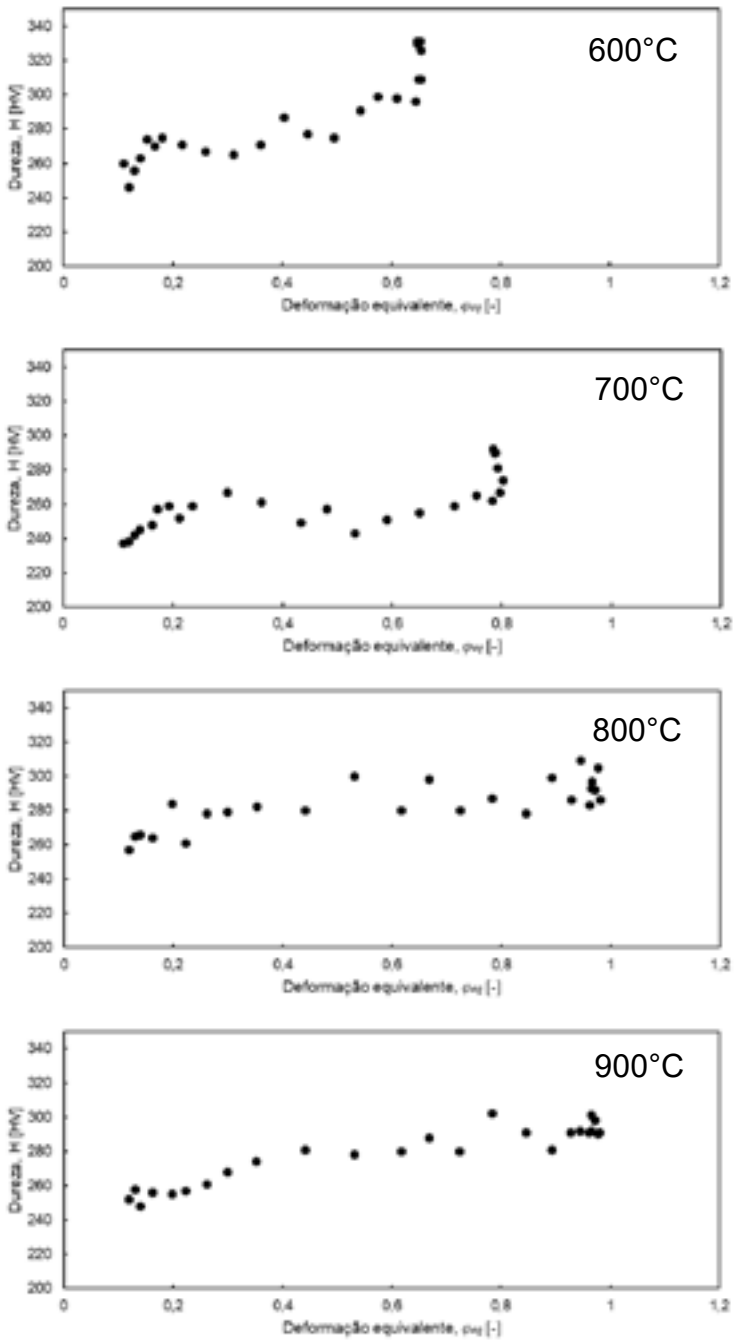


Figura 9 Relação entre os valores de dureza e a deformação equivalente.

A amostra forjada a 600 °C se destaca por apresentar um aumento expressivo da dureza com a deformação. Os valores variam de um mínimo de 246 HV — próximo à dureza da condição inicial — até 331 HV. Para níveis de deformação entre 0,1 e 0,65, observa-se um incremento de dureza de aproximadamente 35%.

No forjamento a 700 °C, o aumento da dureza em função da deformação é menos expressivo que o verificado a 600°C. A dureza mínima observada é de 237 HV para uma deformação equivalente de $\varphi_{eq} = 0{,}11$, enquanto o valor máximo atinge 300 HV em $\varphi_{eq} = 0{,}78$.

As amostras forjadas a 800 °C e 900 °C apresentam comportamento bastante semelhante. Em ambas as condições, os valores de dureza situam-se em torno de 250 HV para níveis mais baixos de deformação, alcançando aproximadamente 300 HV

para deformações próximas de $\varphi_{eq} = 0.8$. A partir desse ponto, a dureza estabiliza, mantendo-se em torno de 300 HV, mesmo com o aumento adicional da deformação.
A redução das forças de conformação é um dos principais benefícios associados ao forjamento a morno. Para quantificar o efeito da temperatura de forjamento sobre a força requerida, foram obtidos dados de força e deslocamento durante os ensaios. A Figura 10 apresenta a evolução da força de forjamento em função do deslocamento da prensa para uma redução de altura de 35%. Já a Figura 11 compara os valores máximos de força de forjamento nas diferentes temperaturas analisadas, também para 35% de redução.

As curvas força-deslocamento exibem comportamento semelhante entre si, com tendência de aumento nas cargas requeridas à medida que a temperatura de forjamento diminui. O forjamento a 900 °C demanda a menor força, enquanto a redução da temperatura para 800 °C resulta em um aumento discreto da carga máxima, de aproximadamente 8%, indicando que essa condição ainda representa uma alternativa eficiente em termos de consumo energético.

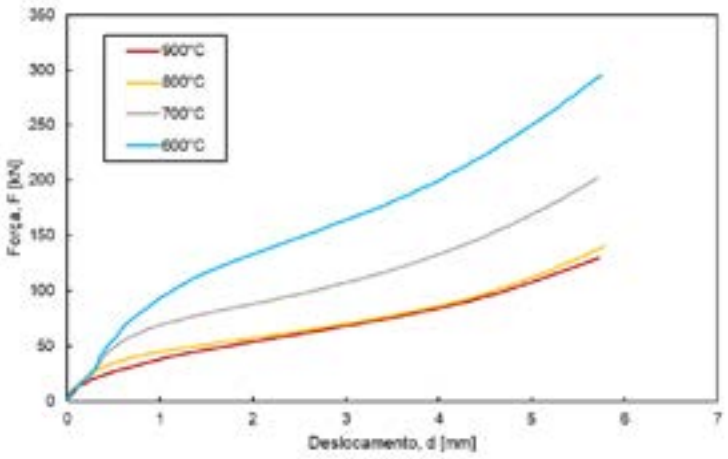


Figura 10 Evolução da força de forjamento em função do deslocamento da prensa para a redução de altura de 35%.

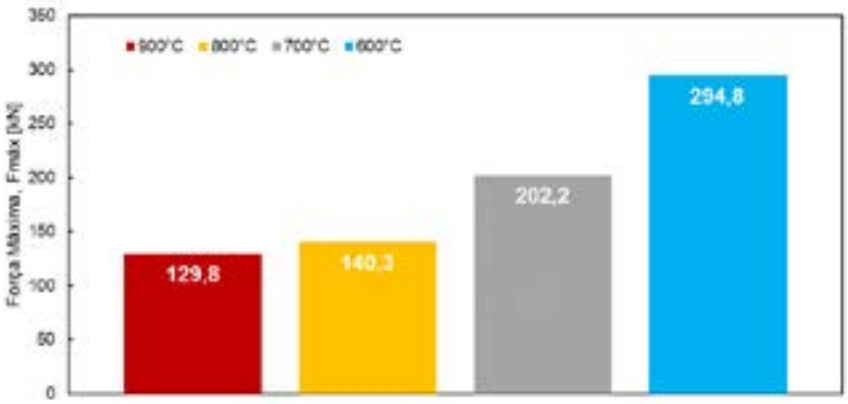


Figura 11 Força máxima de forjamento para a redução de altura de 35%.

A conformação a 700 °C e 600 °C, por outro lado, requer forças significativamente mais elevadas. O forjamento a 700 °C demanda uma força aproximadamente 55% superior à observada a 900 °C, enquanto a 600 °C esse aumento atinge 127%.

Nas temperaturas de 900 °C e 800 °C, a presença de austenita durante a deformação e a ocorrência de mecanismos termicamente ativados, como a recuperação e a recristalização dinâmica, resulta em menores tensões de escoamento

e, consequentemente, em menores forças de conformação. Já nas condições de 700 °C e 600 °C, não ocorre transformação de fase, e, conforme evidenciado pelas micrografias, não há indícios de recristalização. Em razão disso, o material mantém alta resistência ao escoamento durante a deformação, exigindo forças significativamente maiores para o processamento.

As maiores forças exigidas durante o forjamento a 600 °C e 700 °C impossibilitaram a reprodução da redução de 55% em altura para todas as temperaturas analisadas. Essa limitação justifica os diferentes níveis de deformação considerados na análise.

Outro importante benefício associado ao forjamento a morno é a melhoria da qualidade superficial das peças em comparação ao forjamento a quente, no qual a formação de óxidos superficiais é significativamente intensa. Para avaliar o efeito da temperatura de forjamento na qualidade superficial, foi realizada a quantificação da rugosidade das amostras, cujos resultados são apresentados na Figura 12.

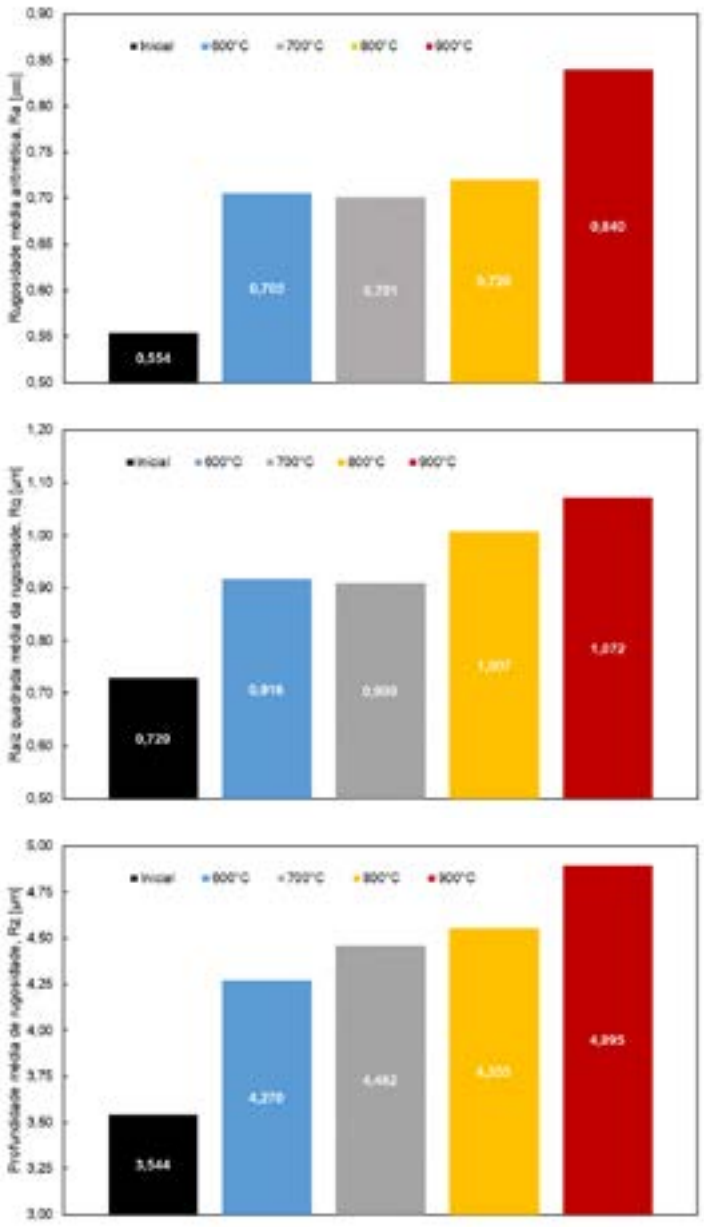


Figura 11 Rugosidade das amostras forjadas em diferentes temperaturas e da condição inicial

Como era esperado, a condição inicial apresenta os menores valores de rugosidade para todos os parâmetros analisados, refletindo o acabamento das barras descascadas. Com o aumento da temperatura de forjamento, observa-se uma elevação nos valores de rugosidade, sendo os maiores registrados na condição de 900 °C (Ra = 0,840 µm; Rq = 1,072 µm; Rz = 4,895 µm). Entre as amostras forjadas, as temperaturas de 600 °C e 700 °C resultam nos menores índices de rugosidade, indicando melhor qualidade superficial. Esse comportamento está associado à maior formação de óxidos superficiais em temperaturas mais elevadas. O forjamento nas temperaturas de 600 °C, 700 °C e 800 °C resulta em superfícies com rugosidade média compatível com a classe de acabamento N6, conforme a norma ABNT NBR 6405, que classifica os acabamentos superficiais com base nos valores de rugosidade Ra. A classe N6 indica um acabamento fino, com boa qualidade superficial. Já o forjamento a 900 °C apresenta rugosidade correspondente à classe N7, indicando um acabamento médio, com a superfície aceitável para funções mecânicas comuns.

4. CONCLUSÕES

O presente trabalho demonstrou que o forjamento a morno do aço microligado ao vanádio DIN 30MnVS6 resulta em microestruturas refinadas, com ganhos significativos de dureza e qualidade superficial, especialmente na temperatura de 800 °C. Nessa condição, observou-se a combinação entre boa conformabilidade, redução das forças de forjamento e acabamento superficial compatível com a classe N6 de rugosidade.

Temperaturas mais baixas (600 °C e 700 °C) proporcionaram maior endurecimento por deformação, enquanto temperaturas mais elevadas (900 °C) favoreceram mecanismos de recristalização dinâmica. A 900 °C, apesar da menor força de conformação, observou-se pior acabamento superficial devido à oxidação.

Os resultados evidenciam a viabilidade técnica do forjamento a morno como alternativa aos processos convencionais, com potencial para produzir forjados de alta qualidade e resistência, reduzindo custos com tratamentos térmicos e melhorando a eficiência produtiva. O aço DIN 30MnVS6 se destaca como material promissor para aplicações estruturais, contribuindo para o avanço de rotas mais sustentáveis e competitivas na indústria metalúrgica.

Agradecimentos

Os autores agradecem a CNPq, CAPES e FAPERGS pelo apoio financeiro.

REFERENCIAS

[1] BLECK, W., BAMBACH, M., WIRTHS, V., STIEBEN, A., Microalloyed Engineering Steels with Improved Performance—An Overview. HTM J. Heat Treatm. Mat., 2017.

[2] BUCHMAYR B., Critical Assessment 22: bainitic forging steels, Materials Science and Technology, 2016.

[3] ERIŞIR E., AYHAN İ.İ., GÜNEY C., Microstructure and Phase Transformations in High-Strength Bainitic Forging Steel. J. of Materi Eng and Perform 30, 3458–3467, 2021.

[4] GRAMLICH A., LANGE R., ZITZ U., BÜßENSCHÜTT K., Air-Hardening Die-Forged Con-Rods—Achievable Mechanical Properties of Bainitic and Martensitic Concepts, Metals, 2022.

[5] Stieben A. , Bleck W. , Schönborn S., Lufthärtender duktiler stahl mit mittlerem mangangehalt für die massivumformung massivUmformung (2016)

[6] Gramlich A., T. Schmiedl, S. Schönborn, T. Melz, W. Bleck, Development of air-hardening martensitic forging steels, Materials Science and Engineering: A, Volume 784, 15 May 2020, 139321

[7] INTERNATIONAL COLD FORGING GROUP, document No.18/07, 40 Years History Document, 2007.

[8] EXEL N., TÜRK M., Einfluss von Faserverlauf und Gefüge auf die Schwingfestigkeit Warmmassivumgeformter AFP-Stähle, Final Report, AVIF A 245, Forschungsgesellschaft Stahlverformung e.V., 2010.
[9] KREMER C. & MULLER-BABIC K., Connecting Rods Made of Micro-alloyed Forged Steel, DEVELOPMENT Materlals, MTZ worldwide volume 81, 2020.
[10] Kuratomi, H., Uchino, M., Kurebayashi, Y., Namiki, K., Sugiura S., Development of Lightweight Connecting Rod Based on Fatigue Resistance Analysis of Microalloyed Steel,SAE Technical Paper, 1990.
[11] BS EN 10267-1999, Ferritic-Pearlitic Steels for Precipitation Hardening from Hot-working Temperatures, 1999.
[12] BAO, Y., Prediction of Ductile Crack Formation in Uncracked Bodies, Engineering Mechanics, Wuhan University of Technology, 1993.

CHAPAS / Brddrg
14ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas
11° Congresso do BrDDRG

PALESTRAS E TRABALHOS TÉCNICOS
LECTURES & TECHNICAL PAPERS

1 - Uma visão geral sobre a determinação geral das curvas de limite de conformação
An overview on determination of Forming Limit Curves
Dorel BANABIC (Technical University of Cluj (Napoca -Romania)

2 - Graus AHSS para estampagem a quente e a frio
AHSS Grades for Hot and Cold Stamping
Eren BİLLUR (Billur Metal Form, Ankara Turquia)

3 - Rebitagem embutida dupla com colagem adesiva
Double-flush riveting with adhesive bonding
João M.B. Alpendre, Pedro M.S. Rosado, Rui F.V. Sampaio, João P.M. Pragana, Ivo M.F. Bragança, Carlos M.A. Silva e Paulo A.F. Martins (IDMEC, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Portugal / CIMOSM, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Instituto Politécnico de Lisboa, Portugal)

4 - Estudo de Performance de uma Longarina Traseira em Alumínio de Alta Resistência
Rear Crush Performance Study with High Strength Aluminum
Oliver Toribio (NOVELIS, São Paulo SP)

5 - Sensor de força de baixo custo para medir a força de estampagem profunda usando computação de borda
Low-Cost Sensor Force for Measuring Deep drawing Force Using Edge Computing
Fabio Tiburi, Lirio Schaeffer (UFRGS); Roderval Marcelino (UFSC)

6 - Análise bibliométrica de estampagem a quente para aços de ultra/alta resistência
Bibliometric analisys of press hardening of ultra/high strength steels
Fabio André Lora (Universidade Federal do Recôncavo da Bahia UFRB - Feira de Santana BA), Gabriel Santana Ribeiro (UFRB), Djoille Denner Damm (UFRB), Tiago Nunes Lima (SENAI CIMATEC), Rodrigo Santiago Coelho (SENAI CIMATEC).

7 - Hot stamping – From state of the art to process solutions for future applications
Marion MERKLEIN (Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg)

8 - Determinação dos Limites de Deformação na Estampagem Incremental
Determination of Strain Limits in Incremental Sheet Forming
Rafael Gustavo Schreiber, Alysson Henrique Rudek, Bianca Grahl Reyes (IFSC - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina – Lages SC) e Rafael Santiago Floriani Pereira (UFSC)

9 - Desenvolvimento da Liga 51CrV4 na Laminação de Helicoides para Transportadores de Grãos
Development of 50CrV4 Alloy for Helicoid Rolling in Seeds Conveyor Systems
Daniel Augusto Ferro, Thomas Frank (Waelzholz Brasmetal – São Bernardo do Campo SP)

10 - Estudo da estampagem incremental em chapas de alumínio para validação geométrica de canais aplicados na fabricação de placas absorvedoras de calor para coletores solares
Study of incremental forming in aluminum sheets for geometrical validation of channels applied the manufacture of heat absorbing plates for solar collectors
Gilson de March, Lirio Schaeffer (UFRGS); Anderson Daleffe, Daniel Fritzen (UNISATC); Henrique Cechinel Casagrande (UFSC); Morvan Antônio Américo, Pedro Henrique Menegaro Possamai (UNISATC)

11 - Trincas na Dobra do Aço ABNT NBR 6655: Influência da Velocidade de Deformação e do Sentido de Laminação
Influence of Strain Rate and Rolling Anisotropy on Crack Formation in the Bending of Low-Carbon Steel
Daniel Cunha Barros, Carlos Alexandre dos Santos (PUCRS)

12 - Caracterização mecânica a morno de uma liga de alumínio
Warm Mechanical Characterization of an Aluminum Alloy
Matheus Riffel, Rafael Pandolfo, André Rosiak, (LdTM / CBCM - UFRGS); Luis Fernando Folle (CTISM/ UFSM); Tiago Lima (SENAI/CIMATEC); Lirio Schaeffer (CBCM/UFRGS)

13 - Influência da marcação a laser na estampabilidade de chapas de alumínio em estampagem incremental
Influence of laser marking on the drawability of aluminum sheets during incremental sheet forming
Paulo Vitor Fedri Carvalho, Alysson Henrique Rudek, Bianca Grahl Reyes, Milton Pereira, Márcio Celso Fredel, Rafael Gustavo Schreiber, Rafael Santiago Floriani Pereira (UFSC Florianópolis SC / IFSC Lages SC)

14 - Rota para fabricação de peças estruturais por estampagem a frio seguido de têmpera localizada
Evaluation of an alternative manufacturing route for structural automotive parts by cold forming and localized tempering using resistive heating
Matheus Passos Sarmento Santos, Tiago Nunes Lima, Bruna Callegari (SENAI CIMATEC – Salvador BA), Luis Fernando Folle (UFSM), Jessica Santana e Gustavo Curti (BENTELER)

15 - Modelagem Numérica por Elementos Finitos do Processo de Estampagem Incremental e Modelo de Dano Dúctil no Abaqus
Finite element numerical modelling of the incremental forming process and Abaqus ductile damage model
Paulo Henrique Silva Santos, Andrea Madeira Kliauga, Danielle Cristina Camilo Magalhães, Luciana Montanari, Sérgio Henrique Evangelista (Universidade Federal de São Carlos UFSCar / Escola de Engenharia de São Carlos EESC USP, São Carlos SP)

16 - A importância da precisão na simulação para a transformação digital e a implementação de IA
The importance of simulation accuracy for digital transformation and AI implementation
Emerson Dias da Silva (AUTOFORM, São Paulo SP)

17 – Análise do efeito da rugosidade em canais de resfriamento para aplicação em estampagem a quente
Analysis of the effect of roughness on cooling channels for hot stamping applications
Bruno Caetano dos Santos Silva, Luã Fonseca Seixas, Luis Fernando Folle, Gilmar Ferreira Batalha e Rodrigo Santiago Coelho (UFSM, Santa Maria RS)

18- Rapid Tooling no desenvolvimento de Produtos Estampados
Rapid Tooling for sheet metal forming and new product development
Rodrigo Arruda e João Henrique (TechnNOVA – Porto Alegre RS)

19 - Análise dos coeficientes de anisotropia de chapas planas de Alumínio 1200-H14 submetidas a recozimento parcial e ensaiadas após resfriamento a temperatura subzero
Analysis of the anisotropy coefficients of 1200-H14 Aluminum flat sheets subjected to partial annealing and tested after cooling to sub-zero temperature
Daniel Angelo Zattera Milesi, Gaston Henrique Rossa, Júlio de Lima Palhano (LAMEC / UCS, Caxias do Sul RS)

20 - Comportamento mecânico de Tailor Welded Blanks (TWBs) do Usibor®1500 nas condições pré e pós-estampagem a quente
Mechanical Behavior of Tailor Welded Blanks (TWBs) of Usibor® 1500 in As-Received and Post Hot Stamping Conditions
Luana de Lucca de Costa, André Rosiak, Diego Pacheco Wermuth, Lirio Schaeffer (LdTM / CBCM UFRGS)

CHAPAS / Brddrg
14ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas
11° Congresso do BrDDRG

21 - Inteligência Artificial Aplicada na Modelagem do Comportamento de Deformação a Quente de Chapas Metálicas

Artificial Intelligence Applied to Modeling the Hot Deformation Behavior of Metal Sheets

André Rosiak. Rafael Pandolfo da Rocha, Matheus Henrique Riffel, Lirio Schaeffer (LdTM / CBCM / UFRGS)

TRABALHO EM PÔSTER

Parametrização de propriedades de sistemas de laser para otimização de contraste de marcas para estampabilidade de chapas de alumínio em estampagem incremental

Parameterization of laser system properties for optimization of mark contrast for stampability of aluminum sheets in incremental stamping

Paulo Vitor Fedri Carvalho, Rafael Gustavo Schreiber, Rafael Santiago Floriani Pereira, Marcio Celso Fredel e Milton Pereira (UFSC / IFSC Lages)

44º SENAFOR

28ª Conferência Internacional de Forjamento - Brasil
14ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas / 11º Congresso do BrDDRG
14ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis
3ª Conferência Internacional de Inovação em Materiais e Manufatura
Porto Alegre, RS, dias 1, 2 e 3 de outubro de 2025
www.senafor.com

Sensor de força de baixo custo para medir a força de estampagem profunda usando computação de borda

Fabio Tiburi MSc [1]
Dr. Ing Lírio Schaeffer [2]
Dr. Roderval Marcelino [3]

RESUMO

A medição da força de um processo de estampagem profunda não é um procedimento novo em laboratório, mas no chão de fábrica isso é um desafio devido a muitos aspectos, como os custos dos instrumentos e o ambiente hostil para isso. Depois que a indústria 4.0 começa, a necessidade de medir o processo e a aquisição de dados é cada vez mais necessária. Este artigo mostra como projetar um sensor de baixo custo acessível para fazer essa aquisição de força em qualquer ferramenta ou equipamento de prensagem no chão de fábrica usando computação de borda. Os resultados mostraram que é possível ter os dados com sensores de baixo custo que apesar de não serem dados sofisticados, podem ajudar muito a produção.

Key words — Sensor de força, computação de borda, estampagem profunda, aquisição de dados.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o número de empresas que monitoram o processo produtivo vem aumentando. O número de empresas que oferecem produtos para realizar essa tarefa está crescendo rapidamente e os processos de conformação são os mesmos. Mesmo que o custo dos instrumentos para forçar a aquisição no processo de

[1] UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande Do Sul.
[2] UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande Do Sul
[3] UFSC-Universidade Federal de Santa Catarina

estampagem profunda ainda seja relativamente alto ou difícil de encontrar uma solução industrial. A maioria dos sistemas de medição de força é dedicada a processos de fabricação laboratoriais ou muito críticos, oferecendo dados de alta precisão, alta taxa de amostragem, que são usados para fins de pesquisa. Esses sistemas de aquisição são caros e delicados de usar no chão de fábrica.

O principal objetivo deste artigo é explorar uma maneira de projetar e produzir um sensor de baixo custo usando tecnologia de computação de borda para medir uma força de tração profunda. Este sensor pode ser aplicado diretamente em ferramentas de estampagem profunda que coletam dados e enviam para a nuvem para serem analisados usando um site. As informações de força serão usadas para monitorar o desgaste da ferramenta, melhorando a qualidade e a eficiência do processo de estampagem profunda.

2. ARQUITETURAS DE COMPUTAÇÃO

As arquiteturas de computação estão evoluindo muito e se tornando descentralizada. Fala-se muito em computação em nuvem, névoa ou computação de borda. Cada uma destas arquitetura tem sua particularidade.

2.1. Computação em nuvem

A computação em nuvem é um modelo para o fornecimento e uso de tecnologias de informação e comunicação. Eles fornecem acesso remoto a vários recursos de computação comuns na forma de serviços via Internet.

Este sistema de computador pode ser dividido em duas partes: dispositivos clientes e servidores. Existem também três tipos de nuvens. Este tipos de nuvens são chamados de serviços de TI: infraestrutura como serviço (IaaS), plataforma como serviço (PaaS) e software como serviço (SaaS) [1]. O uso destas tecnologias na manufatura e na indústria oferece oportunidades úteis para eficiência, conectividade, escalabilidade, comunicação entre sensores e sistemas de computação e aumenta a capacidade de armazenamento e processamento de dados.

2.2 Computação em névoa

São sistemas computacionais usados para transportar os recursos de computação em nuvem para mais perto dos dispositivos. Geralmente são sistemas descentralizados no qual os dados são distribuídos entre fontes de dados e a nuvem. Essa é uma arquitetura horizontal que distribui recursos e serviços armazenados na nuvem para dispositivos. Em outras palavras, a computação em névoa pode ser entendida como uma camada intermediária que controla a conexão entre a nuvem e o perímetro da rede.

A diferença mais notável entre a computação em névoa e a computação em nuvem é: enquanto a computação em nuvem é um sistema centralizado, a computação em névoa é uma infraestrutura de sistema descentralizado distribuído. [1]

2.3 Computação de borda

A computação de borda fica na fronteira entre uma planta industrial ou de produção e uma rede. Nessa arquitetura, os dados de origem são processados perto da origem sem serem enviados por longas distâncias (para a nuvem ou outros sistemas de processamento centralizados). Aumenta a transferência de dados para um sistema centralizado reduzindo a distância e o tempo de transferência de dados, bem como a velocidade e eficiência de dispositivos e aplicações.

A principal diferença entre edge computing (computação de borda) e fog computing (computação de névoa) é onde os dados são processados. O processamento de borda é realizado diretamente em dispositivos equipados com sensores ou em gateways fisicamente próximos aos sensores. As vantagens da

computação de borda é a otimização de tempo de conexão e resposta aprimorados. Isso também melhora a segurança implementando a criptografia mais perto do centro de rede. No entanto, a Edge Computing tem um escopo limitado com base em padrões de processamento específicos e predefinidos que ocorrem no final da rede. [2]

3. FORÇA DA ESTAMPAGEM PROFUNDA

O processo de estampagem profunda é composto por um punção que pressiona uma chapa metálica contra uma matriz, criando uma forma desejável. A Figura 1 mostra detalhes do processo.

Este processo gera uma deformação de plasticidade que deforma mecanicamente a chapa metálica por uma força superior ao limite de deformação de elastina e menor que o limite de deformação.

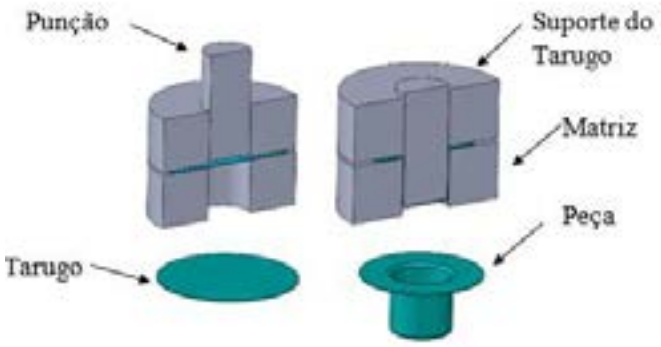


Figure 1: Processo de estampagem profunda

Para calcular a força de estampagem profunda na conformação de chapas metálicas, você pode usar a seguinte fórmula:

$$F = \pi . d . t . \sigma . \left(\frac{D}{d} - 0.6\right) \quad (1)$$

Onde:

F é a força de tração
d é o diâmetro do punção
t é a espessura da folha
σ é a resistência à tração do material
D é o diâmetro do suporte

Esta fórmula ajuda a estimar a força necessária para estampar um pedaço de chapa metálica em uma cavidade da matriz. A força de estampagem é influenciada pelas propriedades do material, espessura da chapa e dimensões do punção e da peça bruta [5].

4. SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS DE FORÇA DE PROCESSO DE ESTAMPAGEM PROFUNDA

Enquanto as medições laboratoriais fornecem um ambiente controlado e preciso para entender o processo de estampagem profunda, as medições industriais oferecem uma avaliação mais realista do processo em condições reais de produção. Ambas as

abordagens são essenciais para otimizar o processo de estampagem profunda e garantir uma produção de alta qualidade. Na estampagem profunda, a distribuição de força é uma variável importante que determina a qualidade do componente formado. A força do suporte do tarugo é um parâmetro de projeto significativo no processo de estampagem profunda. Ajustar essa força pode ajudar a evitar defeitos como rugas, afinamento, rachaduras e deflexões de superfície. [3]

O uso de um sistema de aquisição de dados (DAS) pode ser usado para medir a força aplicada durante a estampagem profunda. Este sistema é uma composição de diferentes elementos para tornar os dados de aquisição de força atuais e confiáveis.

4.1 Sensores de força e elementos de aquisição de dados

Este dispositivos são elementos de medição projetados para a medição precisa das forças de compressão e tração.

- Sensores de força piezoelétricos:

São baseados no princípio de medição piezoelétrica. Eles são adequados para medir forças (altamente) dinâmicas e quase-estáticas. A força que atua no quartzo embutido no sensor gera uma carga proporcional na saída do sinal. Um amplificador de carga a jusante converte isso em um sinal de processo que pode ser avaliado. Uma das vantagens especiais do elemento de medição piezoelétrico é sua precisão de medição constante em uma ampla faixa de medição, portanto, é possível usar um sensor muito grande para medir as menores forças com precisão de medição constante. Os sensores piezoelétricos também são caracterizados por um alto nível de proteção contra sobrecarga, eliminando a necessidade de medidas de proteção, especialmente em faixas de medição baixas. [6]

Os princípios piezoelétricos estão capturando carga elétrica pela força aplicada a um cristal piezoelétrico e causam uma mudança de carga no nível molecular e dentro da estrutura da rede. Essa carga elétrica é capturada na superfície do cristal e convertida em um sinal de tensão por meio do chamado amplificador de carga. A vantagem é que a deformação é extremamente pequena, pois o efeito de carga é causado por mudanças dentro da estrutura atômica. Isso permite a realização de estruturas extremamente rígidas com altas frequências naturais. Isso é ideal para capturar eventos de medição muito rápidos ou de alta frequência. A desvantagem é que a carga elétrica é muito volátil. Onde não há isolamento perfeito, a carga é perdida com o tempo. Isso dificulta as medições estáveis a longo prazo, especialmente se você quiser medir pequenas forças. Além disso, um sensor piezoelétrico está muito mais sujeito a mudanças de temperatura. [7]

- Sensor *strain gauge*:

Captura uma mudança na resistência elétrica induzida por deformação elástica. A força é aplicada a um corpo de mola, que se deforma proporcionalmente à força exercida. Essa deformação novamente causa compressão ou alongamento dos extensômetros conectados e, portanto, uma mudança em sua resistência elétrica. Usando um circuito de ponte de medição elétrica simples, um sinal de tensão utilizável pode ser gerado. A vantagem é que as medições são estáveis a longo prazo e as mudanças de temperatura podem ser melhor compensadas. Sensores com precisão muito alta podem ser realizados. A desvantagem é que a qualidade da aquisição do sinal melhora com o grau de deformação elástica dos extensômetros. Isso significa que sua estrutura é bastante macia, apresentando uma baixa frequência natural, o que é inadequado para eventos de medição mais rápida. Deformação, fadiga do material e a sobretensão são aspectos críticos adicionais deste princípio de medição.

São elementos de medição metaloelétricos que medem com precisão forças, cargas, torque, etc., particularmente em processos estáticos. Os *strain gauges* operam com base no efeito físico pelo qual a resistência elétrica de um fio muda proporcionalmente à tensão exercida no fio quando esticado ou comprimido. Os medidores de tensão são usados em sensores, sensores de força e torque, sensores de carga (para balanças) e outros dispositivos de medição. Os *strain gauges* são frequentemente afixados em corpos de medição feitos de material de alta resistência. A Figura 2 mostra um sensor em ação gerando um sinal para uma medição após uma força ser aplicada.

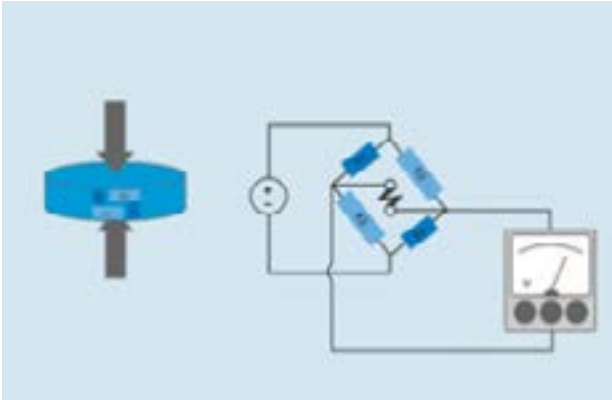


Figure 2: Medição de deformação profunda

- Amplificador de carga:

No campo da tecnologia de medição, um amplificador de carga é essencialmente um conversor de carga que converte sinais de carga muito baixa, como são gerados, por exemplo, por sensores piezoelétricos, em sinais de tensão proporcional (Volt).

- Filtro eletrônico:

Em geral, o termo filtro é entendido como o bloqueio ou passagem de certas faixas de frequência. Dessa forma, um filtro atua no domínio da frequência. A frequência de corte do filtro determina qual conteúdo do sinal é cortado ou pode passar. Um filtro idealizado corta o sinal de medição em uma determinada frequência de corte ou permite que o sinal de medição passe acima de uma determinada frequência de corte, por meio da qual é criada uma separação clara da faixa de frequência necessária. A frequência de corte separa a banda passante da banda de parada do filtro. Um filtro real sempre tem uma faixa de transição da banda passante para a banda de parada na faixa da frequência de corte. Na faixa de transição, os componentes de frequência já estão atenuados, mas não completamente suprimidos. A atenuação já começa nas frequências na banda passante e aumenta continuamente durante a transição para a banda de parada até que os componentes de frequência sejam eliminados. [3]

- Filtro passa-baixa

Com um filtro passa-baixa de, por exemplo, 150 Hz, todas as frequências acima de 150 Hz são cortadas. Assim, o sinal só é passado na faixa de frequência até a frequência de corte definida

- Filtro passa-alta

O comportamento oposto de um filtro passa-baixa se aplica ao filtro passa-alta. Se a frequência de corte for definida em 150 Hz, todas as frequências acima de 150 Hz são transmitidas

- Filtro passa-faixa

Com este tipo de filtro, duas frequências de corte devem ser definidas porque o filtro passa-banda é uma combinação de primeiro um filtro passa-alta seguido por um filtro passa-baixa. Como resultado, uma banda de frequência definida é considerada. Se a frequência de corte inferior for definida em 150 Hz e a frequência de corte superior em 300 Hz, o resultado é uma banda de frequência entre as duas frequências de corte que passa.

- Circuitos de condicionamento de sinal

Converta os sinais do sensor em uma forma que possa ser convertida em valores digitais. Conversores analógico-digital: Um conversor analógico-digital (ADC) converte um sinal de entrada analógico contínuo (por exemplo, voz de um microfone ou valores de medição de um sensor) em valores digitais discretos. Existem duas características principais que são importantes. A resolução vertical é dada pela chamada largura de bits do conversor: por exemplo, um ADC de 4 bits divide a faixa do sinal de entrada em 2^4 = 16 valores digitais. A partir de hoje, as larguras de bits comuns estão na faixa de 18 a 24. Portanto, o menor valor representável é muito menor do que os sinais de interferência que normalmente estão presentes, como por exemplo, ruído de sinal. A taxa de amostragem, às vezes também chamada de frequência de amostragem, é igual ao tempo entre duas amostras e, portanto, é a resolução horizontal no eixo do tempo. Quanto mais valores por unidade de tempo o conversor analógico-digital captura (geralmente declarados como amostras por segundo sps), mais rápido os sinais podem ser gravados. Mas isso implica que mais valores devem ser armazenados; Isso aumenta o requisito de memória. [3] As taxas de amostragem comuns situam-se na gama de apenas algumas amostras por segundo (por exemplo, para temperaturas) até vários milhões de amostras por segundo para sinais muito dinâmicos (por exemplo, explosões).

- Processamento de sinal

O processamento de sinais consiste em extrair informações de sinais pré-processados para tirar as conclusões corretas com base nessas informações. É feita uma distinção entre processamento de sinal analógico e digital.

Por exemplo, se você observar atentamente um sinal analógico de um sensor de força piezoelétrico, o sinal contém não apenas a curva de medição do processo real, mas também componentes de sinal parasitas, como sinais de ruído ou vibrações. Estes últimos têm sua origem na estrutura mecânica. Com o processamento de sinal adequado, a curva de medição do processo real pode ser filtrada.

Existem inúmeros métodos e ferramentas para obter informações importantes dos sinais. Ferramentas comuns no processamento de sinais analógicos, mas também digitais, são os filtros. Aqui, um sinal é processado de tal forma que os componentes indesejados do sinal são filtrados.

No processamento digital de sinais, as transformadas de Fourier - comumente chamadas de FFT (*Fast Fourier Transform*) - são muito comuns. As transformadas de Fourier são usadas para decompor sinais discretos, que geralmente estão no domínio do tempo, em seus componentes de frequência. Muitas vezes é mais fácil analisar sinais no domínio da frequência, o que é obtido com uma FFT.

A transição do condicionamento de sinal para o processamento de sinal geralmente é suave.

5. METODOLOGIA

5.1 Design de hardware

Para construir o sensor de baixo custo e conectá-lo a uma ferramenta industrial para operação de estampagem profunda o sistema foi projetado com componentes discretos que incluem um sistema eletrônico incorporado, fonte de alimentação, um sensor, um conversor de sensor de tensão e um estojo. A Figura 3 apresenta os elementos do sistema.

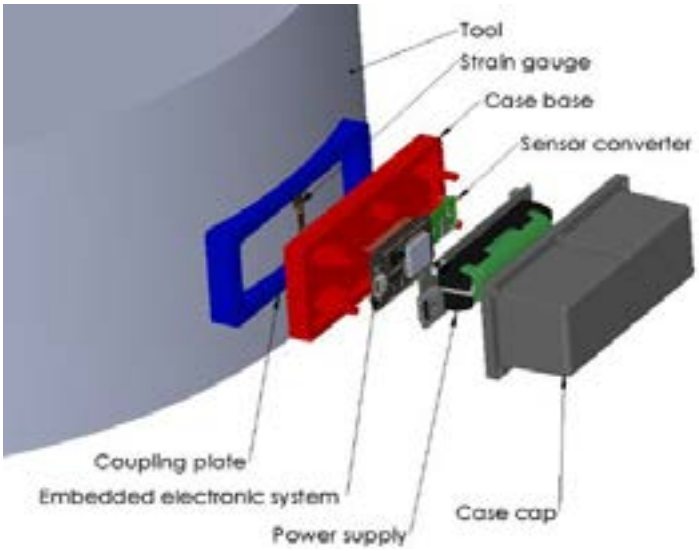


Figura 3: IOT de baixo custo para medição de força em componentes de estampagem profunda

Este dispositivo deve ser forte o suficiente para suportar variações de temperatura, diferente taxas de aceleração e campos eletromagnéticos gerados no ambiente de chão de fábrica para garantir a precisão e confiabilidade dos dados coletados. Neste estudo, os principais componentes são descritos a seguir:

a) Sistema eletrônico embarcado

O ESP32-WROOM-32U é um System-on-Module (SoM) baseado no microcontrolador ESP32, projetado pela Espressif Systems.

Características principais:

- Processador: Microcontrolador LX6 dual-core de 32 bits 240 MHz
- Wi-Fi 802.11 b/g/n e Bluetooth 4.2 BR/EDR e BLE
- Memória: 4 MB flash, 520 KB SRAM, 448 KB ROM
- Conectividade: Wi-Fi, BT, UART, I2C, I2S, SPI, GPIO
- Criptografia: AES, SHA, RSA, etc.
- Temperatura de operação: -40 ° C a 85 ° C
- Baixo consumo de energia: 5 µA no modo de hibernação

Vantagens:

- Baixo custo
- Alto desempenho
- Baixo consumo de energia
- Fácil integração com outros dispositivos
- Suporte para vários protocolos de comunicação

Especificações:

- Dimensões: 18 x 25 x 3 mm
- Peso: 2 gramas
- Faixa de frequência: 2,4 GHz
- Certificação: FCC, CE, RoHS

O módulo ESP32-WROOM-32U é uma solução versátil e poderosa para projetos que requerem conectividade Wi-Fi e Bluetooth, processamento de dados e controle de dispositivos. Seu baixo consumo de energia e tamanho pequeno o tornam ideal para IoT e dispositivos vestíveis.

b) Fonte de alimentação

Este é um componente crítico para o sensor devido a possíveis sinais de ruídos e interferências eletromagnéticas que podem surgir na rede elétrica. Portanto, o uso de uma bateria foi escolhido para evitar estes problemas. Neste sensor, a fonte de alimentação utilizada foi a bateria blindada 1860 que é uma fonte de alimentação compacta e de alto desempenho projetada para várias aplicações, incluindo dispositivos industriais, médicos e IoT. Seu design blindado minimiza a interferência eletromagnética (EMI) e a interferência de radiofrequência (RFI).

Características principais:

- Alta eficiência (até 85%)
- Baixo consumo de energia em espera
- Tamanho compacto (1,86" x 0,74" x 0,43")
- Design blindado para redução de EMI e RFI
- Proteção contra sobretensão (OVP)
- Proteção contra curto-circuito (SCP)
- Alta confiabilidade e longa vida útil

Especificações:

- Tensão de entrada: 85-265 VAC
- Tensão de saída: 3,3 V, 5 V, 12 V
- Corrente de saída: Até 6A
- Potência: até 120W
- Temperatura de operação: -20 ° C a 70 ° C
- Certificações: UL, CE, RoHS.

c) Medidor de tensão

Como mencionado anteriormente, para capturar a força, é possível usar o sensor de deformação. Neste caso, foi usado o strain gauge Kyowa HFG-5-350-C1-11:

Características principais:

- Tipo: Medidor de tensão elétrico, tipo filme fino.
- Material: Constantan (liga de cobre-níquel).

- Largura: 5 mm.
- Comprimento: 350 mm.
- Resistência: 350 Ω.
- Sensibilidade: 2,1 ± 0,5% (mV/V).
- Faixa de temperatura: -200 ° C a 200 ° C.
- Precisão: ±0,5% do valor medido.

Benefícios:
- Alta precisão: medições precisas de deformação.
- Estabilidade: Resistente a variações de temperatura e umidade.
- Flexibilidade: Adequado para superfícies curvas e irregulares.
- Baixo custo: Em comparação com outros strain gauges de alta precisão.
- Fácil instalação: adesivo forte e durável.
- Compatível com sistemas de aquisição de dados padrão.
- Resistente ao desgaste e à corrosão.

Aplicativos

- Estampagem profunda: Medição de deformação em chapas metálicas.
- Teste de material: Análise de propriedades mecânicas.
- Engenharia Estrutural: Monitoramento de deformações em estruturas.
- Aeroespacial: Medição de tensão em componentes críticos.
- Automotivo: Teste de componentes e estruturas.

d) Conversor de sensor

Considerando esta aplicação de sensor de baixo custo, uma das partes mais caras é o conversor de sensor ou, como sabe, o registrador de dados. Neste sensor foi utilizado o amplificador de strain gauge HX711:

Especificações técnicas:
- Tipo: conversor analógico-digital (ADC) de 24 bits e amplificador.
- Faixa de entrada: ±20 mV a ±40 mV.
- Ganho: 128x ou 64x programável.
- Resolução: 24 bits (1:16.777.216).
- Taxa de amostragem: até 80 Hz.
- Tensão de operação: 2,7 V a 5,5 V.
- Consumo de corrente: 1,5 µA (standby), 1,5 mA (ativo).

Benefícios:
- Alta precisão e exatidão.
- Baixo ruído e alta relação sinal-ruído.
- Compacto e leve.
- Fácil integração com microcontroladores.
- Baixo consumo de energia.
- Adequado para várias configurações de strain gauge.

Aplicativos:
- Medição de peso: balanças, balanças e células de carga.
- Medição de deformação: Monitoramento estrutural, teste de material.
- Medição de força: Automação industrial, robótica.
- Dispositivos médicos: Monitoramento de pacientes, pesquisa médica.

• Aeroespacial: Monitoramento da integridade estrutural.

e) Embalagem

Para construir todas as caixas para o sensor, foi utilizada uma impressora de filamento 3D. Este caso está dividido em três partes. Acoplamento de base para conectar na ferramenta, caixa de base para segurar todos os componentes e tampa da caixa para proteger todos os componentes(Figura 4).

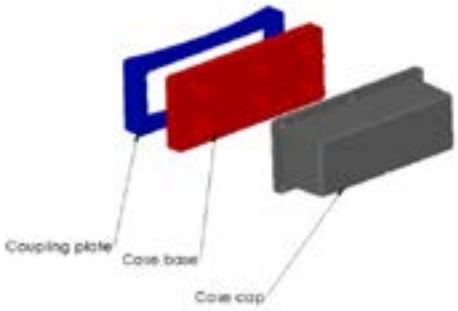


Figura 1: Componentes da embalagem

5.2 Arquitetura de software

Arquitetura de microsserviços

A arquitetura de microsserviços foi escolhida para o sistema de sensores de baixo custo para melhorar a escalabilidade e a manutenção. Ao dividir o sistema em serviços menores e independentes, cada serviço pode ser desenvolvido, implantado e dimensionado de forma independente. Essa abordagem é particularmente benéfica para sensores de baixo custo, pois permite atualizações e melhorias incrementais sem interromper todo o sistema. Além disso, facilita a solução de problemas e a manutenção, o que é crucial para manter os custos baixos.

Padrão MVC (Model-View-Controller)

O padrão MVC foi implementado para separar as preocupações dentro do aplicativo, facilitando o gerenciamento e o dimensionamento. Para um sistema de sensor de baixo custo, essa separação é vital, pois permite que os desenvolvedores trabalhem em diferentes partes da aplicação simultaneamente sem interferência. O modelo lida com os dados e a lógica de negócios, a exibição gerencia a interface do usuário e o controlador processa a entrada do usuário e atualiza o modelo e a exibição. Essa divisão clara de responsabilidades simplifica o desenvolvimento e a manutenção, reduzindo os custos gerais.

RESTful API

Uma API RESTful foi usada para simplificar a programação de aplicativos, fornecendo uma maneira padronizada de interagir com o sistema. Para um sensor de baixo custo, isso é essencial, pois garante que o sistema possa se comunicar facilmente com outros dispositivos e serviços. As APIs RESTful usam métodos HTTP padrão, tornando-as fáceis de implementar e usar. Essa simplicidade reduz o tempo e os custos de desenvolvimento, tornando-a a escolha ideal para sistemas de sensores de baixo custo.

Ao empregar esses princípios arquitetônicos, o sistema de sensores de baixo custo atinge um equilíbrio entre escalabilidade, facilidade de manutenção e economia, garantindo desempenho confiável e facilidade de uso.

5.3 Fluxo de dados

Coleta dados do sensor

O dispositivo ESP32 lê duas portas analógicas de conversores de sensores que recebem sinais de *strain gauge*. Reúne a deformação axial e radial. Esses sensores monitoram continuamente o ambiente e coletam dados em tempo real com uma taxa de amostragem de 100Hz.

O dispositivo transmite dados para a API

Depois que os dados são coletados e processados, o dispositivo ESP32 os transmite para a API. Essa transmissão é feita usando protocolos de comunicação como HTTP ou MQTT. O HTTP é um protocolo amplamente utilizado para enviar dados pela Internet, enquanto o MQTT é um protocolo de mensagens leve, ideal para dispositivos IoT. Os MQTT foram escolhidos por serem mais rápidos e de baixa latência em comparação com o HTTP.

API processa dados

A API, criada usando o *Spring Boot*, recebe os dados de entrada do dispositivo. Ele processa esses dados para garantir que estejam no formato correto e prontos para armazenamento. Esse processo inclui tarefas como validação, transformação e agregação de dados. A API atua como intermediária, garantindo que os dados estejam limpos e estruturados antes de serem armazenados no banco de dados.

API armazena dados no banco de dados PostgreSQL

Depois de processar os dados, a API os armazena em um banco de dados PostgreSQL. O PostgreSQL é um poderoso sistema de gerenciamento de banco de dados relacional de código aberto, conhecido por sua confiabilidade e escalabilidade. A API usa consultas SQL para inserir os dados processados nas tabelas apropriadas no banco de dados. Isso garante que os dados sejam organizados e facilmente acessíveis para uso futuro.

O banco de dados armazena dados para consulta e análise

O banco de dados PostgreSQL armazena os dados coletados, disponibilizando-os para consulta e análise. Os usuários podem executar consultas SQL para recuperar pontos de dados específicos ou gerar relatórios com base nos dados armazenados. Esses dados podem ser usados para várias finalidades, como monitorar condições ambientais, analisar tendências ou tomar decisões baseadas em dados. Os recursos robustos de consulta do banco de dados permitem recuperação e análise de dados eficientes.

5.4 Sistema para sensor de baixo custo

Dispositivo de aquisição de dados (Arduino)

- **Software**: C++/Arduino IDE
- **Função**: Coletar dados do sensor (goivagem de tensão) e transmiti-los ao servidor. A plataforma eletrônica de código aberto da Arduino facilita os projetos de IoT, fornecendo um ambiente versátil e fácil de usar para o desenvolvimento de aplicativos baseados em sensores

API (Spring Boot)

- **Linguagem**: Java
- **Estrutura**: Spring Boot
- **Função**: Receba dados do dispositivo, processe-os e armazene-os em um banco de dados. O Spring Boot fornece uma estrutura robusta e escalável que simplifica o desenvolvimento de aplicativos prontos para produção com configuração mínima. Sua flexibilidade e eficiência são cruciais para manter baixos custos operacionais.

Banco de dados (PostgreSQL)

- **Sistema de gerenciamento de banco de dados**: PostgreSQL
- **Versão**: 13.2
- **Função**: Armazenar dados coletados. O PostgreSQL garante gerenciamento de dados confiável e escalável com recursos avançados, como conformidade com ACID, consultas complexas e extensibilidade. Sua natureza de código aberto ajuda a manter os custos baixos, ao mesmo tempo em que fornece recursos poderosos de banco de dados.

Servidor *(Ubuntu)*

- **Sistema operacional**: Ubuntu Server
- **Versão**: 20.04 LTS
- **Função**: API de host e banco de dados. O Ubuntu Server oferece estabilidade e segurança, tornando-o a escolha ideal para hospedar aplicativos e serviços. Sua natureza de código aberto e versão LTS (suporte de longo prazo) garantem um ambiente de servidor econômico e confiável.

Armazenamento de dados no Oracle Cloud

Os dados coletados pelo sistema de sensores de baixo custo são armazenados no Oracle Cloud em uma máquina virtual (VM) executando o Ubuntu. Essa configuração oferece vários benefícios:

- **Escalabilidade**: O Oracle Cloud oferece recursos escaláveis, permitindo que o sistema lide com quantidades crescentes de dados sem custos adicionais significativos.
- **Custo-benefício**: Usar uma VM com Ubuntu no Oracle Cloud é uma solução econômica, pois aproveita o software de código aberto e a infraestrutura em nuvem para minimizar as despesas.

- **Confiabilidade**: O Oracle Cloud fornece um ambiente confiável e seguro para armazenamento de dados, garantindo que os dados coletados estejam seguros e acessíveis quando necessário.

Ao escolher esses componentes e aproveitar o Oracle Cloud, o sistema alcança um equilíbrio de baixo custo, escalabilidade e confiabilidade, tornando-o uma solução ideal para aplicativos de sensores de baixo custo.

6. CÁLCULO DOS CUSTOS

Como dito anteriormente, este projeto visa tornar os sensores de menor custo possível para serem usados em larga escala em qualquer ferramenta em uma fábrica. Considerando todos os componentes descritos, o custo do hardware foi de US$ 26,6. Veja a tabela 1. É uma análise importante que esse preço fosse o preço de varejo do usuário final, se esse sensor fosse construído em uma escala, o custo total seria pelo menos dez vezes menor do que o apresentado. Além disso, o custo de desenvolvimento não foi considerado nesta análise. Mas o tempo estimado para desenvolvê-lo foi de cerca de 300 horas para todo o design, código e teste.

Tabela 1: Levantamento de custos

Descrição	Qty	Custo unitário (US$)	Custo subtotal (US$)
Sistema eletrônico	1	5.2	5.2
Strain Gouge	2	3.2	6.4
Conversor de sensor	1	4.0	4.0
Fonte de alimentação	1	2.0	2.0
Caso	1	8.0	8.0
Fios, conexões etc.	1	1.0	1.0
Custo total			26.6

7. EXPERIÊNCIAS

Para testar tanto a computação de borda quanto a computação em nuvem neste sensor, algumas configurações foram necessárias realizar para os experimentos. Para melhores resultados foi utilizado o protocolo MQTT e todos os dados coletados foram enviados para a corretora em nuvem.

7.1 Computação em nuvem

O primeiro teste foi realizado foi com o algoritmo de firmware que lia uma porta analógica. Esta porta analógica recebia o sinal de uma placa conversora A/D do sensor de deformação e enviava esses dados de estampagem sem filtro matemático. Assim, qualquer ruído gerado durante o processo era enviado para a nuvem pela rede Wi-Fi.

Essa abordagem envia dados para a nuvem para processamento adicional e armazenamento de longo prazo usando conectividade com a Internet.

A nuvem oferece recursos escaláveis para realizar análises complexas, aprendizado de máquina e armazenamento de dados de longo prazo.

Após o recebimento dos dados, foi plotado um gráfico mostrado na Figura 5.

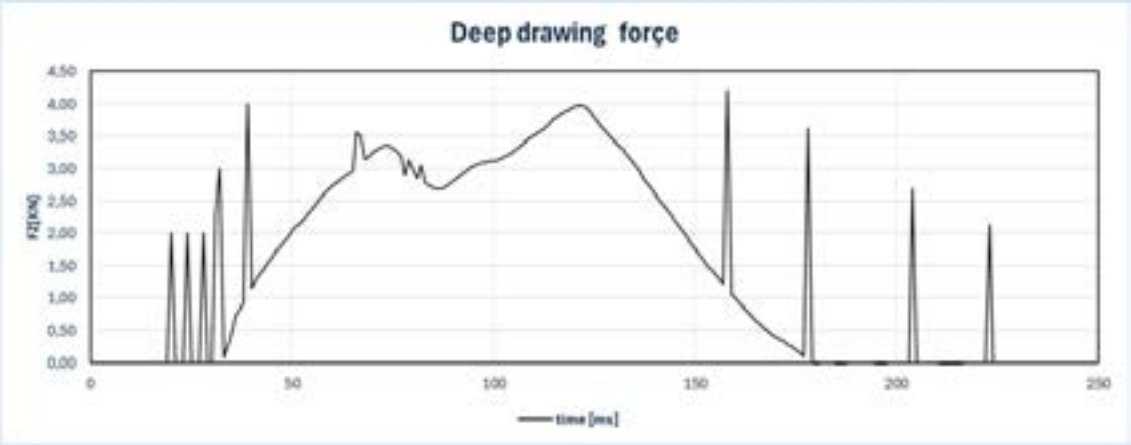


Figura 5: Gráfico dos sinais de leitura do sensor de deformação

Observe que na figura 5 existem alguns picos no perfil de estampagem profunda, ou seja, alguns ruídos gerados durante a operação de redesenho profundo.

7.2 Computação de borda

Os segundos experimentos foram conduzidos usando o algoritmo de computação de borda no microcontrolador que se conecta à internet via Wi-Fi, mas antes disso, processa dados localmente na borda da rede, reduzindo a latência e permitindo respostas em tempo real. Os nós de borda lidam com necessidades imediatas de processamento, como filtragem de ruído digital.

O processamento de dados localmente ajuda a proteger informações confidenciais, minimizando sua exposição à Internet.

Ao processar dados localmente, a quantidade de dados enviados para a nuvem é minimizada, economizando largura de banda e reduzindo a latência.

Em seguida, os dados recebidos foram usados para plotar um gráfico mostrando a força de estampagem profunda por tempo. A Figura 6 mostra o sinal gerado com o filtro aplicado.

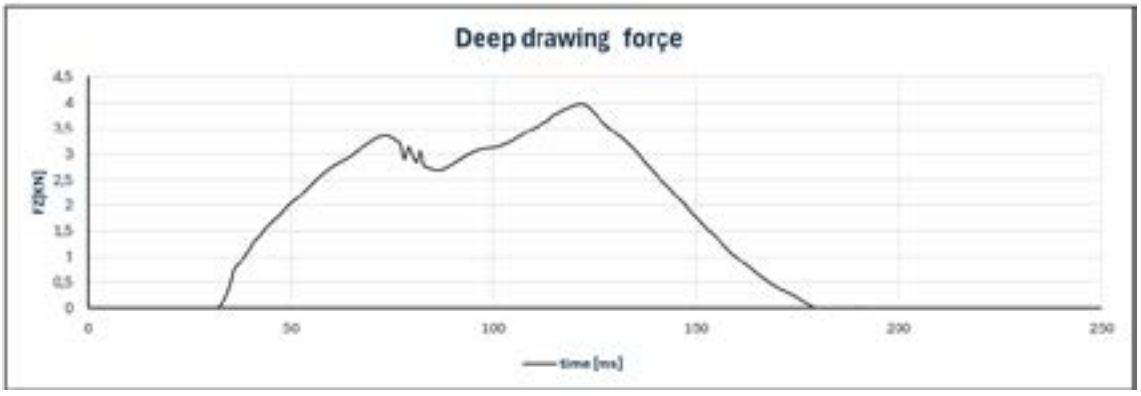


Figura 2: Força de estampagem profunda com filtro aplicado

8. CONCLUSÃO

A resolução da resposta da força de tempo descreve o processo de estampagem profunda adequado para aplicações industriais. No qual é a principal informação de força e suas variações características.

Depois deste projeto se concentrar na obtenção de dados usando sensores de força de baixo custo, é possível concluir que hoje é possível aplicar essa abordagem na tecnologia atual e na obtenção de resultados melhores para capturar dados de estampagem profunda, neste caso força, sem instrumentos de laboratório sofisticados e caros.

Esses dados não têm a mesma taxa de amostragem em comparação com os registradores de dados tradicionais, mas para a análise rápida do fenômeno durante o processo de estampagem profunda, é suficiente para agir e otimizá-lo.

A computação em nuvem não é adequada para este aplicativo devido a perdas de dados devido à latência da conexão e velocidade da Internet.

O uso de edge computing e o protocolo MQTT são indicados para medir a força da aplicação industrial devido ao menor armazenamento de dados e enviam apenas informações para a nuvem, não dados brutos de alto volume.

O uso de transmissão sem fio e fonte de alimentação da bateria evita a fiação na área do operador e diminui o corte de cabos e a manutenção do sensor. Mas a otimização do algoritmo e dos parâmetros do microcontrolador é um cuidado para a longa autonomia da bateria, evitando a frequência de recarga e a parada da pressa.

9. REFERÊNCIAS

[1] Xu, Hansong & Yu, Wei & Griffith, David & Golmie, Nada. (2018). Uma pesquisa sobre a Internet das Coisas Industrial: Uma Perspectiva de Sistemas Ciberfísicos. Acesso IEEE. PÁG. 1-1. 10.1109/ACCESS.2018.2884906.

[2] Khujamatov K., Reypnazarov E., Khasanov D., Akhmedov N. Redes e Computação em Internet das Coisas e Sistemas Ciber-Físicos Universidade de Tecnologias da Informação de Tashkent

[3] R,Minerva P, Maria Emanuela, F. Laura, G, Antonella, T. Luigi, Controle robusto do draw-in em um processo de repuxo profundo: uma abordagem baseada em medição

[4] Minerva R., Biru A., Rotondi D. Rumo a uma definição da Internet das Coisas (IoT) // IEEE Internet Initiative. 2015. Nº 1. pág. 1-86. https://iot.ieee.org/images/files/pdf/

[5] Merklin M., Gruner M. (2014). Determinação dos coeficientes de atrito em estampagem profunda pela modificação da fórmula de Siebel para o cálculo da força de desenho ideal.

[6] Huda, Z. (2024). Estampagem profunda de chapa metálica. In: Processos de conformação de metais. Série de Engenharia Mecânica. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-56760-5_12

[7] Lee EA, Seshia SA Introdução aos sistemas embarcados: uma abordagem de sistemas ciberfísicos. Londres, MIT Press Publ., 2016.

[8] Siddikov I.Kh., Sattarov Kh.A., Khujamatov Kh.E. Modelagem dos Elementos de Transformação do Controle de Fontes de Energia // Internacional

[9] Conferência sobre Aplicações, Tendências e Oportunidades de Ciência da Informação e Tecnologias de Comunicação (ICISCT), 2ª, 3ª e 4ª Xu, Hansong & Yu, Wei & Griffith, David & Golmie, Nada. (2018).

[10]Uma pesquisa sobre a Internet das Coisas Industrial: Uma Perspectiva de Sistemas Ciberfísicos. Acesso IEEE. PÁG. 1-1. 10.1109/ACCESS.2018.2884906.

44º SENAFOR

28ª Conferência Internacional de Forjamento - Brasil
14ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas / 11º Congresso do BrDDRG
14ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis
3ª Conferência Internacional de Inovação em Materiais e Manufatura
Porto Alegre, RS, dias 1, 2 e 3 de outubro de 2025
www.senafor.com

ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA DE ESTAMPAGEM A QUENTE PARA AÇOS DE ULTRA/ALTA RESISTÊNCIA

Gabriel Santana Ribeiro [1]
Djoille Denner Damm [2]
Rodrigo Santiago Coelho [3]
Tiago Nunes Lima [4]
Fábio André Lora [5]*

RESUMO

Os aços de ultra-alta resistência (UHSS) são amplamente adotados em setores como a indústria automotiva para melhorar a segurança e a eficiência estrutural de componentes metálicos. O processo de estampagem a quente desses aços combina aquecimento e deformação para obter peças com alta resistência mecânica. Revestimentos como o Al-Si são essenciais nesse processo para garantir a integridade do material, protegendo-o da oxidação e promovendo propriedades tribológicas desejadas. Apesar do crescente uso dessa tecnologia, ainda existem desafios na otimização dos revestimentos, especialmente quanto à interação entre o processo térmico e as propriedades finais do aço revestido. Compreender o estado atual da pesquisa é fundamental para orientar novos estudos e inovações. O objetivo da pesquisa é identificar lacunas e tendências em estudos sobre o uso de revestimentos de Al-Si em processos de estampagem a quente aplicados a UHSS, visando orientar futuros avanços. A hipótese é que o corpo atual de literatura apresenta lacunas significativas, identificáveis por meio de uma análise bibliométrica criteriosa. A metodologia baseou-se em um levantamento na plataforma Scopus, com combinações progressivas de palavras-chave. Dados preliminares indicam que, embora existam milhares de publicações sobre estampagem a quente, apenas 28 documentos atendem aos filtros específicos de UHSS e Al-Si, reforçando a hipótese. A escassez de literatura focada na sinergia entre revestimentos Al-Si e aços UHSS representa uma oportunidade para contribuição científica. Este estudo visa preencher essa lacuna, oferecendo um mapa detalhado do conhecimento atual e apontando caminhos para inovações que explorem todo o potencial dessa tecnologia essencial à engenharia moderna.

Palavras-chave: Estampagem a quente; aços de ultra alta resistência.

1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda por veículos mais leves, seguros e energeticamente eficientes tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias avançadas de conformação de materiais metálicos. Nesse contexto, a estampagem a quente (press hardening) de aços ultra resistentes (Ultra High Strength Steels – UHSS), especialmente aqueles com revestimentos de alumínio-silício (Al-Si), tem ganhado destaque na literatura científica e na indústria automobilística. A análise de 32 documentos indexados na base Scopus entre 2010 e 2024 revelam um aumento expressivo nas publicações a partir de 2017, refletindo o avanço das exigências estruturais e ambientais da mobilidade moderna.

O uso de revestimentos Al-Si em processos de press hardening permite que os componentes automotivos resistam a temperaturas elevadas sem sofrer oxidação, mantendo propriedades mecânicas superiores[1]. Este avanço é fundamental para atender às rigorosas normas de segurança veicular e às metas globais de redução de emissões. A produção científica concentra-se, sobretudo, nas áreas de Ciência dos Materiais e Engenharia, com enfoque em novas ligas metálicas, modelagem térmica e controle microestrutural.

Instituições de países como Suécia, China, Coreia do Sul, Alemanha e Canadá lideram as pesquisas, apoiadas por programas governamentais de incentivo à inovação e por investimentos significativos de grandes montadoras, como Ford, Volkswagen e Hyundai [2]. Essa colaboração entre academia e indústria tem acelerado o desenvolvimento de revestimentos híbridos, métodos avançados de deposição e simulações computacionais que otimizam o desempenho estrutural dos componentes.

Diante deste cenário, torna-se essencial compreender as tendências tecnológicas, científicas e industriais associadas à estampagem a quente de UHSS com revestimento Al-Si, visto que essa técnica desempenha papel estratégico na transição para uma mobilidade mais segura, leve e sustentável.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A pesquisa bibliométrica é uma metodologia consolidada na análise quantitativa da produção científica, sendo amplamente utilizada para mapear a evolução de um campo do conhecimento, identificar tendências, principais autores, revistas, palavras-chave e redes de colaboração. Fundamenta-se nos princípios da bibliometria, entendida como a aplicação de métodos estatísticos e matemáticos a livros e outros meios de comunicação, com o objetivo de sistematizar e interpretar a dinâmica da produção e disseminação do conhecimento científico.

A aplicação da bibliometria é particularmente eficaz quando associada a bases de dados consolidadas como Scopus, Web of Science e Dimensions, que oferecem recursos avançados de recuperação, filtragem e exportação de dados. Entre os indicadores mais comuns utilizados nas análises bibliométricas estão o número de publicações por ano, distribuição por país e instituição, coautoria, cocitação e coocorrência de termos. Ferramentas como VOSviewer, Bibliometrix (em R) e CiteSpace auxiliam na visualização desses dados, facilitando a interpretação dos resultados.

Portanto, a fundamentação teórica da pesquisa bibliométrica se sustenta na análise crítica e sistemática da produção científica de determinado tema, contribuindo para uma compreensão ampla de seu estado da arte, suas perspectivas futuras e seu impacto social, técnico ou científico.

2.1. Processo de Press Hardening

O processo de press hardening ou conformação a quente com têmpera integrada, é uma tecnologia amplamente utilizada na indústria automotiva para a fabricação de componentes estruturais de elevada resistência mecânica e leveza. Ele consiste no aquecimento de chapas metálicas, geralmente de aço boro (como o 22MnB5), até a temperatura de austenitização (cerca de 900 °C). Em seguida, a chapa é transferida rapidamente para uma matriz refrigerada, onde ocorre simultaneamente a conformação e a têmpera, transformando a microestrutura do material em martensita[3].

Esse processo resulta em peças com elevada dureza e resistência à tração, comumente superiores a 1.500 MPa, o que permite a fabricação de componentes mais finos e leves sem comprometer a integridade estrutural. Com isso, o press hardening contribui significativamente para a redução do peso veicular, aumento da segurança e eficiência energética.

A relevância técnica do press hardening tem promovido avanços significativos em pesquisas nas áreas de ciência dos materiais, engenharia de manufatura, simulação computacional e desenvolvimento de novos aços de alta resistência. Assim, o mapeamento bibliométrico sobre esse tema revela-se estratégico para compreender a evolução tecnológica, os principais centros de pesquisa e as tendências emergentes no setor.

3. METODOLOGIA

A pesquisa é de natureza exploratória, com abordagem qualitativa, baseada em levantamento bibliométrico. O objetivo principal é mapear e analisar a produção científica relacionada à aplicação de revestimentos Al-Si em processos de estampagem a quente de aços de ultra alta resistência (UHSS), com o intuito de identificar tendências, lacunas e contribuições relevantes no campo da engenharia de materiais e conformação térmica.

Considerando a crescente relevância do tema, este estudo propõe uma análise bibliométrica da produção científica relacionada ao press hardening de aços UHSS com foco em revestimentos Al-Si. A metodologia aplicada baseou-se em uma busca estruturada na base de dados Scopus, acessada por meio do Portal de Periódicos da CAPES, utilizando uma combinação de palavras-chave técnicas e suas variações, incluindo: “press hardening”, “hot stamping”, “hot forming”, “ultra high strength steel”, “UHSS”, “coating” e “Al-Si”. Essa estratégia de busca foi adotada para garantir abrangência e relevância nos resultados, permitindo uma análise quantitativa e qualitativa das publicações indexadas entre 2010 e 2024.

A ausência de publicações indexadas na base Scopus anteriores a 2010 sobre o uso de revestimentos Al-Si em processos de estampagem a quente de aços UHSS pode ser explicada por fatores relacionados ao estágio de maturação tecnológica do tema. Até o início dos anos 2000, o processo de press hardening com revestimentos específicos como o Al-Si ainda se encontrava em fases iniciais de aplicação industrial, restrito a testes experimentais ou a relatórios técnicos de fabricantes, muitas vezes não publicados em periódicos científicos indexados. Além disso, o desenvolvimento e a disseminação dos aços UHSS de terceira geração, que requerem tecnologias de conformação térmica mais avançadas começaram a ganhar destaque apenas a partir de 2005, impulsionados pelas novas exigências de segurança veicular e redução de peso segundo a associação Europeia de Fabricantes de Automóveis

A trajetória do revestimento Al-Si na indústria teve início em 1999, com a patente fundamental da ArcelorMittal, que viabilizou comercialmente essa solução

originalmente desenvolvida para proteção anticorrosiva em altas temperaturas. No entanto, foi somente a partir de 2007 que a sua adoção em larga escala pelo setor automotivo começou[4], especialmente após a sua integração no processo de estampagem a quente de aços 22MnB5 liga que se tornou padrão para aplicações estruturais. Dessa forma, os estudos com enfoque acadêmico e impacto bibliométrico só começaram a ser publicados de forma consistente na literatura internacional a partir de 2010, momento em que a técnica passou a ser mais explorada em programas de pesquisa aplicada e projetos de inovação tecnológica.

A presente pesquisa bibliométrica foi conduzida por meio de uma busca estruturada na base de dados Scopus, com o objetivo de mapear a produção científica relacionada ao processo de estampagem a quente (press hardening) em aços de ultra alta resistência (Ultra High Strength Steels – UHSS), com foco especial em revestimentos do tipo Al-Si. As principais palavras-chave empregadas na busca foram:

- "press hardening" OR "hot stamping" OR "hot forming": expressões que descrevem os processos termoformadores aplicados aos aços de alta resistência, comumente utilizados na indústria automotiva.

- "ultra high strength steel" OR "uhss": termos que identificam as ligas metálicas de elevada resistência mecânica, foco central da pesquisa.

- "coating": utilizado para filtrar estudos que abordam a aplicação de revestimentos, aspecto fundamental no desempenho dos aços em processos de conformação térmica.

- "Al-Si": refere-se especificamente aos revestimentos à base de Alumínio-Silício, que desempenham papel essencial na proteção contra oxidação e desgaste durante o processo de estampagem a quente.

A combinação progressiva desses termos resultou nos seguintes quantitativos de documentos indexados na Scopus.

Tabela 1: Etapas de busca

Etapa de Busca	Termos Utilizados	Documentos Encontrados
primeira	“Press hardening” OR “hot stamping”	3.682
segunda	+ “ultra high strength steel” OR “UHSS”	286
terceira	+ “coating”	52
quarta	+ “Al-Si”	28

Depois foram analisados separadamente e 7 artigos foram descartados por não acrescentarem itens suficientes para a pesquisa. Esses resultados preliminares indicam um escopo relevante de publicações, demonstrando a crescente atenção da comunidade científica à combinação entre resistência mecânica elevada, processos de conformação térmica e estratégias de revestimento protetivo. A análise detalhada desses documentos subsidiará as etapas seguintes da pesquisa, com foco na identificação de tendências, lacunas e principais contribuições no campo estudado.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir da análise conjunta de 21 publicações científicas selecionadas entre 28 inicialmente avaliadas, foram identificados avanços relevantes e desafios persistentes no processo de estampagem a quente de aços de ultra alta resistência com revestimento Al-Si. As evidências bibliográficas concentram-se em três eixos principais: mecanismos de desgaste, parâmetros térmicos e transformações microestruturais, e etapas de processamento subsequente.

4.1. Desgaste e Comportamento dos Revestimentos Al-Si

A gripagem (galling) continua sendo um dos principais desafios enfrentados nos processos de estampagem a quente, especialmente em aços de ultra-alta resistência (UHSS) com revestimento Al-Si. Estudos indicam que a severidade do desgaste por adesão está diretamente correlacionada com a temperatura do processo. Em torno de 700 °C, ocorre maior transferência de material entre a ferramenta e a chapa, intensificando a gripagem. Em contrapartida, a temperaturas próximas de 900 °C, há uma redução significativa da aderência, sugerindo que o controle térmico do processo é determinante para mitigar o desgaste das ferramentas[5].

Além da proteção contra a oxidação durante o aquecimento, o revestimento Al-Si mostra-se eficaz na preservação da qualidade superficial e na manutenção das propriedades de soldabilidade dos componentes estampados. A estabilidade da camada intermetálica Fe-Al-Si formada é fundamental, sendo necessário o controle de sua espessura e morfologia para evitar fragilização na interface aço/revestimento[6].

4.2. Parâmetros Críticos de Aquecimento e Transformações de Fase

A análise das publicações revela uma crescente adoção de métodos de aquecimento por contato direto como alternativa mais eficiente aos fornos convencionais. Entre as vantagens destacam-se maior velocidade de aquecimento, redução do espaço físico necessário e melhor controle microestrutural, favorecendo a manutenção das fases desejadas no aço revestido. A taxa de aquecimento é apontada como um parâmetro crítico, influenciando a formação de fases intermetálicas, como Fe-Al e Fe-Al-Si, que afetam diretamente a resistência térmica e a adesão do revestimento [1]. Embora importantes para a integridade da camada protetora, essas fases devem ser controladas em quantidade e espessura para evitar perda de ductilidade do conjunto.

Outro ponto-chave identificado nos estudos é o Coeficiente Médio de Transferência de Calor Interfacial (IHTC Médio), uma variável crítica para o desempenho térmico do processo. Sua modelagem e mensuração adequadas são essenciais para garantir uniformidade no aquecimento e previsibilidade nos ciclos térmicos, sendo especialmente relevante nos métodos de aquecimento rápido [6].

4.3. Processos Subsequentes e Tratamentos Térmicos

O processamento subsequente à estampagem, como a soldagem a laser, destaca-se como tecnologia de união dos componentes conformados, oferecendo alta precisão e controle térmico localizado, o que evita alterações indesejadas na microestrutura adjacente. Já o revenimento é apontado como tratamento complementar essencial para ajustar as propriedades mecânicas, especialmente após soldagem ou conformação. Esse processo otimiza dureza, tenacidade e alivia tensões residuais induzidas, sendo aplicado após a têmpera in-situ do aço para corrigir a dureza excessiva e aumentar a tenacidade. Isso torna o material menos suscetível à fratura frágil ou falhas sob carga dinâmica, algo fundamental em peças estruturais automotivas, onde o equilíbrio entre resistência e ductilidade é essencial para o

desempenho em colisões[6].

O revenimento consiste em um reaquecimento controlado do componente a temperaturas intermediárias (geralmente entre 200 °C e 600 °C), seguido de resfriamento lento, promovendo o relaxamento das tensões internas sem comprometer significativamente a microestrutura martensítica formada na estampagem a quente. Dessa forma, complementa o processo ao garantir propriedades mecânicas mais equilibradas e melhor desempenho funcional das peças, sendo amplamente utilizado após etapas como soldagem, conformação complexa ou usinagem posterior.

4.4. Indicadores Bibliométricos e Relevância Científica

A análise bibliométrica revelou os artigos mais citados no campo, conforme figura 1.

Figura 1: Autores mais citados.

Figura 2: Principais autores com mais publicações.

A análise dos artigos mais citados evidencia uma forte conexão entre os pesquisadores e os centros de excelência em materiais e engenharia de manufatura, situados em países com grande protagonismo no setor automotivo. Por exemplo, Pelcastre, com 69 e 41 citações respectivamente, são associados a instituições na Suécia e Alemanha, países com forte tradição na engenharia de materiais e sede de montadoras como Volvo e Volkswagen.

Khan, segundo autor mais citado com 61 menções, está vinculado a centros de

pesquisa na Coreia do Sul, alinhando-se ao protagonismo tecnológico de empresas como Hyundai e Kia. Já Venema, com 46 citações, representa o ecossistema de inovação europeu, particularmente nos Países Baixos, que investem fortemente em processos sustentáveis de fabricação.

Liang, com 28 citações, está relacionado à produção científica chinesa, país que lidera a produção global de aço e possui uma indústria automotiva em acelerada expansão.

Essa correlação entre os autores mais citados e os países/instituições onde atuam demonstra que as contribuições mais impactantes vêm de regiões que conciliam produção acadêmica robusta com demandas industriais estratégicas. A produção científica, portanto, reflete diretamente os interesses da indústria automotiva global em desenvolver soluções mais seguras, leves e sustentáveis para veículos modernos.

Com base nos documentos selecionados após os filtros aplicados, tornou-se possível identificar não apenas a relevância dos temas tratados, mas também as palavras-chave mais recorrentes nos estudos. A análise da frequência dessas palavras-chave oferece uma visão mais clara sobre os principais focos de investigação dentro do escopo delimitado, permitindo evidenciar os conceitos, materiais e processos que têm recebido maior atenção por parte da comunidade científica. A seguir, apresenta-se um panorama das sete palavras-chave mais frequentemente utilizadas nos artigos analisados:

Figura 3: Principais palavras-chave mais utilizadas.

A representação gráfica evidencia que o termo mais recorrente entre os artigos analisados foi "hot stamping", com 28 ocorrências, reafirmando o foco central das pesquisas na conformação térmica de aços de alta resistência. Em seguida, destaca-se "aluminum coatings" (21 ocorrências), o que reforça a importância dos revestimentos na proteção contra oxidação e desgaste durante o processo. Os termos "high strength steel", "stamping", e "ultra-high strength steel" aparecem com frequência similar (entre 13 e 16 menções), indicando um interesse consistente nas propriedades mecânicas dos materiais utilizados. Já as palavras-chave "Al-Si" “coating" e "forging machines", embora com menor número de ocorrências, ainda aparecem de forma significativa e complementam o panorama das tendências atuais, sugerindo abordagens mais específicas e técnicas aplicadas nos estudos recentes. Essa distribuição revela uma convergência temática entre processos térmicos, materiais avançados e tecnologias de proteção superficial, pilares fundamentais para o avanço na área de estampagem a quente de aços ultra resistentes.

Essa redução quantitativa reflete, portanto, um ganho qualitativo: os artigos remanescentes são mais específicos, tecnicamente aprofundados e pertinentes ao

tema central do estudo. Isso também evidencia uma lacuna na literatura, mostrando que, embora o tema geral da estampagem a quente seja amplamente estudado, há pouca produção concentrada na combinação de UHSS com revestimentos Al-Si, que justifica a importância e originalidade da pesquisa.

Esses trabalhos abordam de forma abrangente os temas técnicos discutidos nesta análise: comportamento do revestimento, desgaste, formação de fases intermetálicas, e impacto de variáveis térmicas no desempenho final das peças estampadas.

Foram levantadas também a importância do aumento da segurança nos carros e da diminuição do peso dos carros para melhor desempenho, interligando países onde as pesquisas são feitas e seus respectivos líderes do mercado automotivo

4.5. Relação entre Produção Científica, Países Autores e Indústria Automotiva

A análise bibliométrica revelou uma forte correlação entre os países com maior número de publicações sobre estampagem a quente de aços UHSS com revestimento Al-Si e a presença consolidada de grandes montadoras em seus territórios. Esse alinhamento indica que o avanço das pesquisas está diretamente associado a fatores técnicos e estratégicos, como a busca por segurança veicular e redução do peso estrutural. Países como Suécia, China, Coreia do Sul, Estados Unidos e Canadá se destacam, impulsionados por fabricantes como Volvo, Hyundai, Kia, Ford e General Motors, que investem continuamente em P&D para melhorar o desempenho de materiais aplicados a estruturas automotivas críticas [2]. A Figura 4 apresenta a distribuição das publicações por país, ilustrando esse panorama. Relatórios indicam que o setor automotivo global investe mais de 160 bilhões de dólares por ano em pesquisa, com foco crescente em leveza estrutural, conformação avançada e resistência ao impacto, áreas em que os aços UHSS são protagonistas [7]. A Suécia mantém uma cultura histórica de inovação voltada à segurança automotiva, refletida nas estratégias da Volvo [8], enquanto a Coreia do Sul, com forte apoio governamental, destaca-se pela adoção em larga escala do hot stamping com Al-Si em modelos Hyundai e Kia desde a década passada [9].

Programas europeus, como o Horizon Europe (2021–2027), financiam projetos para redução de emissões e eficiência energética, incentivando o uso de materiais avançados e processos térmicos, segundo a European Commission [10]. O hot stamping com UHSS e revestimentos Al-Si permite fabricar componentes mais leves e finos sem comprometer a rigidez, contribuindo para veículos mais econômicos e sustentáveis, em linha com regulamentos Euro NCAP e metas da Agência Internacional de Energia (IEA). Assim, a produção científica sobre estampagem a quente de UHSS com Al-Si está vinculada a objetivos industriais concretos, envolvendo desempenho técnico, vantagens competitivas, conformidade regulatória e sustentabilidade. Esse contexto reforça a importância da continuidade das pesquisas diante dos desafios da mobilidade futura.

Figura 4: Distribuição de publicações por País de afiliação.

Essa conexão entre países produtores de conhecimento e sua base industrial automotiva revela o interesse estratégico no desenvolvimento de materiais e processos que atendam às exigências contemporâneas da mobilidade, particularmente em dois aspectos cruciais: segurança e eficiência energética.

4.6. Aços UHSS: Segurança Veicular e Redução de Peso

As crescentes exigências regulatórias internacionais, especialmente relacionadas à segurança veicular e sustentabilidade ambiental, têm impulsionado o uso de aços de ultra alta resistência mecânica (UHSS) em estruturas automotivas. Esses materiais são aplicados em zonas críticas de absorção de impacto, como colunas centrais, reforços de portas e áreas de deformação programada, devido à alta resistência à tração e capacidade de preservar a integridade estrutural em colisões severas [3]. O processo de estampagem a quente (press hardening), combinado com revestimentos protetores como Alumínio-Silício (Al-Si), tornou-se tecnologia-chave para conformar geometrias complexas em ligas de elevada resistência, superando limitações dos métodos convencionais a frio, que reduzem ductilidade e aumentam risco de trincas [11].

Entre os benefícios do processo estão a maior absorção de energia em colisões, essencial para a integridade da célula de sobrevivência dos ocupantes, e a possibilidade de reduzir a espessura dos componentes sem perder rigidez, contribuindo para a redução do peso veicular. Essa redução melhora a eficiência energética em veículos a combustão e amplia a autonomia em modelos elétricos, pilares centrais para cumprir metas de descarbonização estabelecidas por iniciativas como Horizon Europe e compromissos da indústria global, conforme dados da Comissão Europeia (2021). Assim, a substituição de peças convencionais por componentes UHSS estampados a quente é uma resposta às demandas por maior segurança, menor impacto ambiental e inovação tecnológica no setor automotivo.

4.7. Distribuição Temporal das Publicações

A análise da distribuição temporal das publicações, conforme ilustrado nos gráficos gerados na linguagem R (Figura 5), evidencia uma produção científica marcada por oscilações ao longo do período entre 2011 e 2024. O ano de 2017 destaca-se como o de maior concentração de publicações, totalizando cinco artigos, o que sugere um período de maior interesse e avanço nas pesquisas relacionadas ao processo de estampagem a quente de aços de ultra alta resistência com revestimento Al-Si.

Esse pico pode estar associado à consolidação de estudos experimentais e ao amadurecimento de aplicações industriais envolvendo esses materiais. Outro ponto de destaque é o ano de 2014, que apresentou três publicações, possivelmente marcando uma fase inicial de intensificação das investigações no tema. Já entre 2016 e 2020, observou-se uma relativa estabilidade na produção, com uma média de duas publicações por ano, o que indica uma manutenção do interesse científico, ainda que em menor escala. Nos anos mais recentes, entre 2021 e 2023, houve uma redução perceptível nas publicações, com apenas um artigo por ano, sinalizando uma possível dispersão das pesquisas para outros temas ou abordagens complementares. No entanto, em 2024, verifica-se um leve crescimento, com duas publicações, o que pode indicar uma retomada da atenção ao tema, talvez impulsionada por novos desafios técnicos ou avanços em tecnologias de revestimento. As tendências de crescimento, queda e retomada do interesse pelo tema estão representadas nos gráficos a seguir.

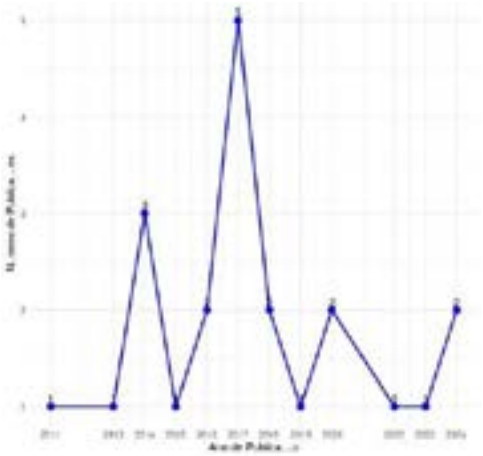


Figura 5: Gráfico em R número de publicações por ano.

A Figura 5 Exibe a evolução anual das publicações (linha temporal), ao realizarmos uma análise visual podemos notar nos principais picos e quedas de produção científica ao longo dos anos, permitindo visualizar o comportamento dinâmico do campo de pesquisa.

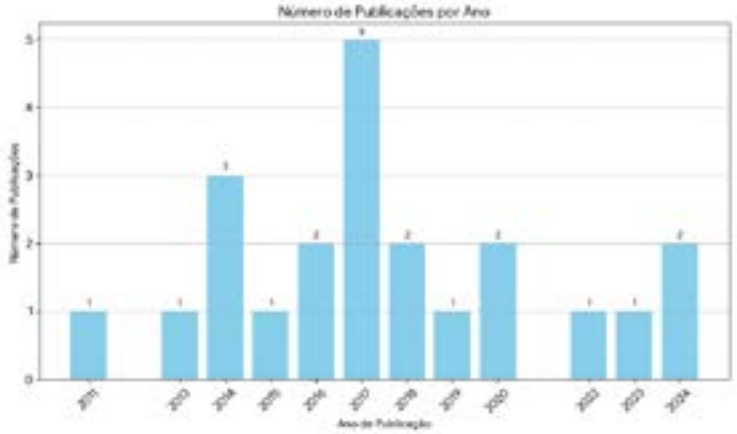


Figura 6: Número de publicações por ano.

A análise da distribuição anual das publicações, apresentada nos gráficos de barras (Figura 6) e de linha (Figura 5), reforça quantitativamente a presença dos estudos ao longo do tempo, evidenciando momentos de maior atividade acadêmica. O pico em 2017, com cinco artigos, está associado à consolidação de pesquisas experimentais anteriores e ao aumento da demanda por soluções que conciliem segurança veicular e redução de peso, impulsionado por investimentos em P&D de montadoras como Volvo, Hyundai e Ford, além de programas de incentivo à inovação da União Europeia e Ásia [10][12]. Esse período também coincide com a implementação de regulações ambientais e metas de eficiência energética mais rigorosas no setor automotivo global [13]. A estabilidade entre 2016 e 2020, com média de duas publicações por ano, indica consolidação do conhecimento, enquanto a queda entre 2021 e 2023, com apenas um artigo anual, pode ser explicada pelo impacto da pandemia e pela dispersão dos esforços para novas abordagens, como revestimentos alternativos ao Al-Si.

A retomada em 2024, com dois artigos publicados, sugere um novo ciclo de

interesse científico, impulsionado por avanços em tecnologias de aquecimento, controle microestrutural e pela pressão da eletrificação automotiva, que demanda materiais mais leves e resistentes [7]. Essa oscilação na produção científica reflete as transformações tecnológicas, industriais e regulatórias que moldam o setor automotivo global e direcionam os focos das pesquisas.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente análise bibliométrica sobre o uso de revestimentos Al-Si em processos de estampagem a quente de aços de ultra alta resistência (UHSS) revelou um campo científico ainda em consolidação, mas de elevada relevância tecnológica e industrial. A partir da filtragem rigorosa na base Scopus e da análise qualitativa de 21 artigos, foi possível identificar tanto os avanços técnicos recentes quanto as lacunas que persistem na literatura.

Verificou-se que os principais desafios ainda se concentram em aspectos como o controle do desgaste por gripagem, a formação de fases intermetálicas na interface aço/revestimento e a modelagem térmica do processo. Ao mesmo tempo, há um claro esforço internacional, liderado por países com forte indústria automotiva, para otimizar a conformação térmica de componentes estruturais automotivos por meio da aplicação de revestimentos Al-Si.

A análise temporal evidenciou um pico de publicações em 2017 e uma leve retomada em 2024, sugerindo um ciclo de maturação do tema e indicando que novos interesses industriais, como a eletrificação automotiva e os desafios ambientais, podem impulsionar novamente a produção científica no setor.

Além disso, foi constatada uma relação estratégica entre as nações com maior volume de publicações e a presença de grandes montadoras, o que reforça o caráter aplicado das pesquisas. Países como Suécia, Coréia do Sul e Estados Unidos utilizam intensamente o conhecimento científico para aprimorar a segurança e reduzir o peso dos veículos, com impactos diretos na eficiência energética.

Como lacunas principais, destaca-se a escassez de estudos voltados a:

- Novos métodos de deposição e composição de revestimentos alternativos ao Al-Si;
- Análises da durabilidade em longo prazo sob diferentes ciclos térmicos;
- Avaliação ambiental do uso de revestimentos em processos industriais.

Dessa forma, este estudo contribui ao oferecer um panorama crítico e sistematizado do estado da arte, além de orientar futuras investigações voltadas à inovação de materiais, sustentabilidade e otimização de processos de conformação térmica. A continuidade das pesquisas multidisciplinares envolvendo ciência dos materiais, modelagem computacional e engenharia de superfícies será fundamental para viabilizar soluções mais eficientes e sustentáveis para a mobilidade do futuro.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao SENAI CIMATEC pela concessão da bolsa de estudos.

REFERÊNCIAS

[1] LI, Zhao; WANG, Lingyu; WANG, Zhou; WANG, Jianfeng; XU, Wei. *A Comprehensive Review towards Oxidation Resistant Press-Hardened Steels*. **High-Temperature Materials**, [S. l.], v. 2, n. 1, p. 10004, mar. 2025. DOI: 10.70322/htm.2025.10004. Disponível em: <doi.org/10.70322/htm.2025.10004>. Acesso em: 20 abr. 2025.,

[2] Associação Alemã da Indústria Automotiva – VDA. Automotive industry is the investment leader. VDA: Research and Development. Disponível em: https://www.vda.de/en/news/articles/2023/research-and-development. Acesso em: 27 mai. 2025.

[3] GORNIK, J. Novas tendências no processo de estampagem a quente. Revista Matéria, v.16, n. 3, p. 194-196, 2011. Disponível em: https://www.gorni.eng.br/Gorni_CongCCM_2011.pdf

[4] HUANG, Mingxin; WANG, Zhou. Hot stamping method for pre-coated steel sheets. U.S. Patent Application No. 20250196213. Publicado em 19 jun. 2025. Disponível em: Justia Patents. Acesso em: 22 julho 2025.

[5] PELCASTRE, L.; HARDELL, J.; PRAKASH, B. Galling mechanisms during interaction of tool steel and Al–Si coated ultra high strength steel at elevated temperature. Tribology International, [S. l.], v. 67, p. 263–271, 2013. DOI: 10.1016/j.triboint.2013.08.007

[6] VENEMA, J.; MATTHEWS, D. T. A.; HAZRATI, J.; WÖRMANN, J.; BOOGAARD, T. van den. Friction and Wear Mechanisms During Hot Stamping of AlSi Coated Press Hardening Steel. Wear, [S. l.], v. 380–381, p. 137–145, 2017. DOI: 10.1016/j.wear.2017.03.014.

[7] STATISTA. Global R&D spending in the automotive industry 2023. 2024. Disponível em: https://www.statista.com. Acesso em: 18 abr. 2025.

[8] UGENSSON, Anders; IVARSSON, Jan. *What the Car Industry Can Do: Volvo Cars*. In: EDVARDSSON BJÖRNBERG, Karin; HANSSON, S. O.; BELIN, Matts Åke; TINGVALL, Claes (eds.). **The Vision Zero Handbook: Theory, Technology and Management for a Zero Casualty Policy**. Cham: Springer International Publishing, 2022. p. 687–725. Disponível em: https://link.springer.com/rwe/10.1007/978-3-030-76505-7_28. Acesso em: 21 abr. 2025.

[9] JU, Hyeon**.** *KIET Annual Report 2022*. Seul: Korea Institute for Industrial Economics & Trade, 2022. Disponível em: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4613215 . Acesso em: 24 abr. 2025.

[10] EUROPEAN COMMISSION. Horizon Europe – The EU Research and Innovation Programme (2021–2027). Brussels: European Commission, 2021. Disponível em: https://ec.europa.eu/programmes/horizon2021/. Acesso em: 15 abr. 2025.

[11] HONGSHENG, L.; WEI, W.; BAO, J. Numerical and Experimental Investigation into Hot Forming of Ultra High Strength Steel Sheet. International Journal of Mechanical Sciences, [S. l.], v. 133, p. 544–555, 2010. DOI:10.1007/s11665-010-9641-1

[12] VOLKSWAGEN AG. Volkswagen Group Annual Report 2023. Wolfsburg: Volkswagen AG, 2024. Disponível em: https://www.volkswagenag.com/en/InvestorRelations.html. Acesso em: 10 abr. 2025.

[13] ACEA – European Automobile Manufacturers Association. The automobile industry pocket guide 2023–2024. Brussels: ACEA, 2023. Disponível em: https://www.acea.auto/publications. Acesso em: 15 abr. 2025.

44º SENAFOR

28ª Conferência Internacional de Forjamento - Brasil
14ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas / 11º Congresso do BrDDRG
14ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis
3ª Conferência Internacional de Inovação em Materiais e Manufatura
Porto Alegre, RS, dias 1, 2 e 3 de outubro de 2025
www.senafor.com

A BIBLIOMETRIC ANALYSIS IN PRESS HARDENING OF ULTRA-HIGH-STRENGTH STEELS

Gabriel Santana Ribeiro [1]
Djoille Denner Damm [2]
Rodrigo Santiago Coelho [3]
Tiago Nunes Lima [4]
Fábio André Lora [5]

ABSTRACT

Ultra-high-strength steels (UHSS) are widely adopted in sectors such as the automotive industry to improve the safety and structural efficiency of metal components. The press hardening process for these steels combines heating and deformation to produce parts with high mechanical strength. Coatings such as Al-Si are essential to ensure material integrity, protecting it from oxidation and promoting desired tribological properties. Despite the growing use of this technology, challenges remain in optimizing coatings, especially regarding the interaction between the thermal process and the final properties of coated steel. Understanding the current state of research is essential to guide new studies and technological innovations. This research aims to identify gaps and trends in studies on the use of Al-Si coatings in press hardening processes applied to UHSS, with a view to guiding future advances. The hypothesis is that the current body of literature contains significant gaps that can be identified through a careful bibliometric analysis. The methodology was based on a bibliometric survey using progressive keyword combinations in the Scopus platform. Preliminary data indicate that, although there are thousands of publications on press hardening, only 28 documents meet the specific filters related to UHSS and Al-Si, supporting the hypothesis. The scarcity of literature focused on the synergy between Al-Si coatings and UHSS steels represents an opportunity for scientific contribution. This study aims to fill this gap by providing a detailed map of current knowledge and pointing toward innovations that can unlock the full potential of this essential technology for modern engineering.

Keywords: Press hardening; ultra-high strength steels; Al-Si coating.

44º SENAFOR

28th International Forging Conference
14th International Sheet Metal Forming Conference / 11th BrDDRG Congress
14th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies – Brazil/RS
3rdInternational Conference on Innovation in Materials and Manufacturing
Hotel Plaza São Rafael – P. Alegre RS, October 1-3, 2025

Determinação dos Limites de Deformação na Estampagem Incremental

Determination of Strain Limits in Incremental Sheet Forming

Alysson Henrique Rudek[1]
Bianca Grahl Reyes[2]
Rafael Santiago Floriani Pereira[3]
Rafael Gustavo Schreiber[4]

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo determinar a Reta Limite de Conformação (RLC) para o processo de estampagem incremental por meio da conformação de peças com diferentes estados de deformação. A metodologia consistiu na realização de experimentos de estampagem incremental em chapas de alumínio puro AA1200-H14 com espessura de 0,8 mm, utilizando um braço robótico ABB IRB 140. Foram empregados uma ferramenta de conformação com raio de 5 mm, velocidade de avanço de 20 mm/s, incremento vertical de 0,5 mm e foi utilizado óleo lubrificante VG100. Três formatos de peças foram conformados: hiperboloide (estado plano de deformações), canal cruzado (estado biaxial de deformações) e canal reto (estado de deformação intermediário entre os dois anteriores). Para cada formato, foram realizadas três

[1] Mechanical Engineering Student; IFSC (Federal Institute of Santa Catarina), Brazil, alysson_hr@hotmail.com
[2] Mechanical Engineering Student; IFSC (Federal Institute of Santa Catarina), Brazil, biancagr2002@gmail.com
[3] Dr. Eng.; UFSC (Federal University of Santa Catarina), Brazil, rsfpereira@gmail.com
[4] Prof. Dr. Eng.; IFSC (Federal Institute of Santa Catarina), Brazil, rafael.schreiber@ifsc.edu.br

repetições, e as deformações principais foram avaliadas por meio de visioplasticidade, considerando uma grade de círculos com diâmetro inicial de 1 mm. Além dos ensaios experimentais, foi realizada uma simulação de elementos finitos no software *QForm UK* para o formato de canal reto, permitindo comparar a distribuição de deformações e a redução de espessura com os resultados medidos. Como resultado, determinou-se a RLC com coeficiente angular aproximadamente igual a uma unidade. Assumindo esse valor padrão para o coeficiente angular, a RLC pode ser definida por meio de experimentos com apenas um formato. Dentre os três formatos avaliados, o canal reto apresentou o menor tempo de processamento, mas também os maiores desafios na determinação das deformações via visioplasticidade, devido ao tamanho da ferramenta e à geometria deformada. Já o formato de hiperboloide, embora demande maior tempo de processamento, mostrou-se o mais fácil de medir, independentemente do tamanho da ferramenta utilizada. A simulação de elementos finitos confirmou o local da fratura obtida nos experimentos de canal reto com erro percentual no valor de espessura mínima de apenas 5,5%.

Palavras chave: Estampagem Incremental, Reta Limite de Conformação, Visioplasticidade, Deformação.

ABSTRACT

This study aims to determine the Fracture Forming Limit Diagram (FFLD) for the incremental sheet forming process by forming parts with different strain states. The methodology consisted of performing experiments on 0.8 mm thick pure aluminum AA1200-H14 sheets using an ABB IRB 140 robotic arm. A forming tool with a 5 mm radius, a feed rate of 20 mm/s, a step down of 0.5 mm, and VG100 lubricating oil were employed. Three part geometries were formed: a hyperboloid shape (plane strain state), a cross-groove shape (biaxial strain state), and a straight-groove shape (intermediate strain state between the two). For each geometry, three repetitions were performed, and the principal strains were evaluated using visioplasticity, considering a grid of circles with an initial diameter of 1 mm. In addition to the experimental tests, a finite element simulation was performed using QForm UK software for the straight-groove shape, allowing comparison of the strain distribution and thickness reduction with the measured results. As a result, the FFLD was determined with a slope of approximately one unit. Assuming this standard slope value, the FFLD can be defined using experiments with just one geometry. Among the three geometries evaluated, the straight channel had the shortest processing time but also posed the greatest challenges for strain determination via visioplasticity due to the tool size and deformed geometry. In contrast, the hyperboloid shape, despite requiring longer processing time, was the easiest to measure, regardless of the tool size used. The finite element simulation confirmed the fracture location obtained in the straight-groove shape experiments with a percentage error in the minimum thickness value of 5.5%.

Key Words: Incremental Sheet Forming (ISF), Fracture Forming Limit Diagram (FFLD), Visioplasticity, Strain

1. INTRODUÇÃO

A estampagem incremental é um processo de conformação de chapas que pode ser utilizado tanto no desenvolvimento de novos produtos (prototipagem) como na fabricação de pequenos lotes de componentes, com a possibilidade de obtenção de geometrias com elevada complexidade [1,2]. Sua aplicação tem sido estudada em diferentes áreas, como por exemplo na fabricação de componentes para a indústria automotiva [3,4], componentes para a indústria aeronáutica [5,6], desenvolvimento de próteses de crânio [7–9], coletores solares [10–12], revestimentos arquitetônicos [13], entre outras aplicações.

Na estampagem incremental os limites de deformação são diferentes dos limites utilizados para a estampagem convencional, expressos pela Curva Limite de Conformação (CLC). Os limites de deformação na estampagem incremental são melhor explicados pela Reta Limite de Conformação (RLC), que é definida por uma linha reta no primeiro quadrante do gráfico de deformações principais do tipo $\varphi_1 = a\varphi_2 + b$ [14], sendo seu coeficiente angular $a = -1$ [14,15]. Para um mesmo material a RLC apresenta deformações superiores à CLC, por conta de que na estampagem incremental é possível obter maiores deformações [16].

Uma forma prática utilizada para definição da RLC para a estampagem incremental é através da conformação de um formato de hiperboloide, no qual se obtém um estado plano de deformações, ou seja, com deformação circunferencial nula ($\varphi_2 = 0$) [17]. No perfil de hiperboloide a cada incremento vertical aplicado contra a chapa o ângulo de parede aumenta gradativamente, enquanto a espessura é diminuída. A conformação da peça prossegue até que se obtenha a deformação máxima e ocorra a ruptura do material. A deformação máxima pode ser obtida por meio da visioplasticidade, sendo importante avaliar que quanto menor for o tamanho da grade utilizada na gravação, maior será a precisão na determinação das deformações [14].

Outra forma de definir a RLC é por meio da estampagem de um canal reto, no qual é obtido um estado de deformações intermediário entre deformação plana ($\varphi_2 = 0$) e expansão biaxial ($\varphi_1 = \varphi_2$) [12]. Com este tipo de geometria a fratura ocorre na extremidade do canal [18,19].

Nos estudos de Do *et al.* [14] foi realizada a construção de RLCs para diferentes materiais a partir da conformação de três formas distintas, com o objetivo de se obter diferentes tipos de deformação (uma pirâmide com ângulo lateral variável, um canal reto em rampa e um canal cruzado em rampa). Como resultado, foi obtido um diagrama com coeficiente angular próximo de -1 para todos os materiais analisados.

Considerando um coeficiente angular -1 para a RLC, a deformação na espessura φ_3 ao longo da reta limite será constante, independentemente do tipo de deformação à qual a chapa for submetida. Isso significa que há uma espessura limite que a chapa pode obter na estampagem incremental para qualquer tipo de deformação aplicada [17]. No entanto, como a estampabilidade do material varia com os parâmetros de processo utilizados na estampagem incremental, é possível obter diversas RLCs para um mesmo material, de acordo com os parâmetros selecionados [11].

Neste trabalho foi determinada a RLC para uma chapa de alumínio AA1200-H14, com espessura inicial 0,8 mm, por meio de três formatos de peças conformadas, a fim de se obter diferentes estados de deformação: hiperboloide (estado plano de deformações), canal cruzado (estado biaxial de deformações) e canal reto (estado de

deformação intermediário entre os dois anteriores). Em seguida, uma simulação pelo método de elementos finitos para o formato de canal reto foi realizada para validar os dados experimentais. As vantagens e desvantagens do uso de cada formato na determinação da RLC foi avaliado.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Experimentos de Estampagem Incremental

Para determinação da RLC para estampagem incremental foram conformadas três diferentes geometrias, a fim de estabelecer os limites de estampabilidade para cada condição de deformação. Nos experimentos foram conformadas chapas de alumínio AA1200-H14 com espessura inicial $s_0 = 0.8\,mm$. Os formatos selecionados foram de hiperboloide, de canal reto e de canal cruzado em rampa. Todos os experimentos foram realizados através de um braço robótico ABB IRB140, o qual conduziu uma ferramenta de ponta semiesférica na trajetória programada para cada formato. Na mesma base do braço robótico foi montado um dispositivo para fixação das chapas a serem conformadas, conforme indicado na Figura 1. O dispositivo de fixação foi fabricado em PLA por meio de impressão 3D, com preenchimento de 20%. Todos os experimentos foram realizados até que fosse identificada a primeira fratura na peça.

Figura 1: Configuração dos experimentos

A trajetória realizada pela ferramenta foi executada com velocidade de avanço de 20 mm/s, enquanto o incremento vertical da ferramenta foi mantido constante em 0,5 mm. A ferramenta de ponta semiesférica utilizada nos experimentos possui raio 5 mm e foi fabricada em aço SAE 1045. A lubrificação da região de contato entre a ferramenta e a chapa foi realizada por meio da aplicação de uma fina camada de óleo VG100.

A análise da deformação máxima obtida em cada peça foi realizada com base em uma grade de círculos de diâmetro $d_0 = 1\,mm$ previamente gravada na superfície das chapas. A gravação da grade de círculos foi realizada por meio de laser, empregando-se um sistema ND-YAG nanopulsado, com frequência 25 kHz, com potência nominal de

20% e velocidade de varredura 1000 mm/s. Durante a conformação, os círculos são deformados assumindo o formato de elipses com dimensões d_1 e d_2 (Figura 2).

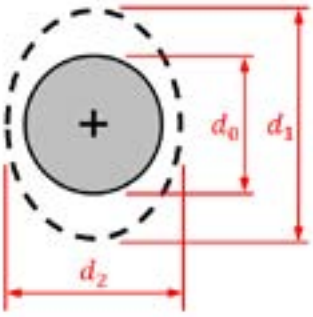


Figura 2: Dimensões utilizadas para determinação das deformações

A deformação meridional (φ_1) e a deformação circunferencial (φ_2) foram determinadas pela Equação 1 e pela Equação 2, respectivamente, enquanto que a deformação em espessura (φ_3) foi calculada por meio da lei da constância de volume.

$$\varphi_1 = \ln\left(\frac{d_1}{d_0}\right) \quad (1)$$

$$\varphi_2 = \ln\left(\frac{d_2}{d_0}\right) \quad (2)$$

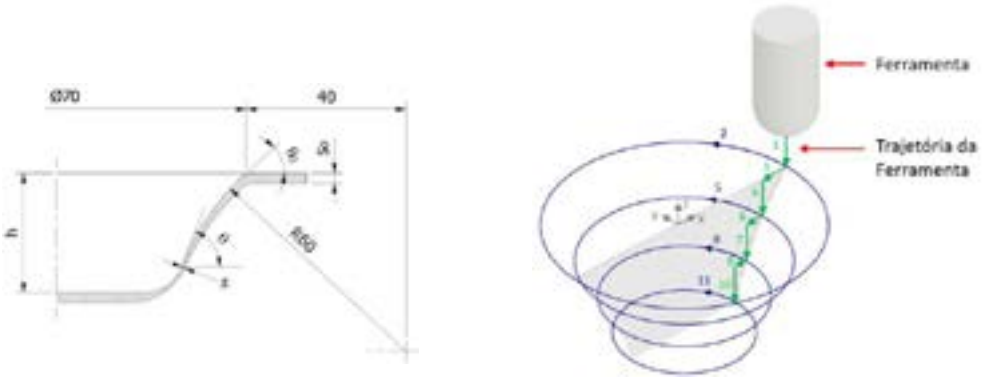
A espessura final obtida em cada experimento (s) foi calculada por meio da Equação 3, onde s_0 é a espessura inicial da chapa.

$$s = s_0 \cdot e^{\varphi_3} \quad (3)$$

Após a ocorrência da fratura em cada experimento, foi identificada a elipse mais próxima da região fraturada, sendo essa utilizada como referência para a determinação da deformação verdadeira em cada sentido. As elipses foram medidas por meio de escala flexível.

A RLC foi determinada a partir de três diferentes formatos de conformação, com três repetições realizadas para cada um deles. Na conformação do formato de hiperboloide se obtém deformação plana ($\varphi_2 = 0$) [20], enquanto com o formato de canal cruzado em rampa se obtém expansão biaxial ($\varphi_1 = \varphi_2$) [14] e para o formato de canal reto se obtém um estado intermediário entre estes outros formatos [12].

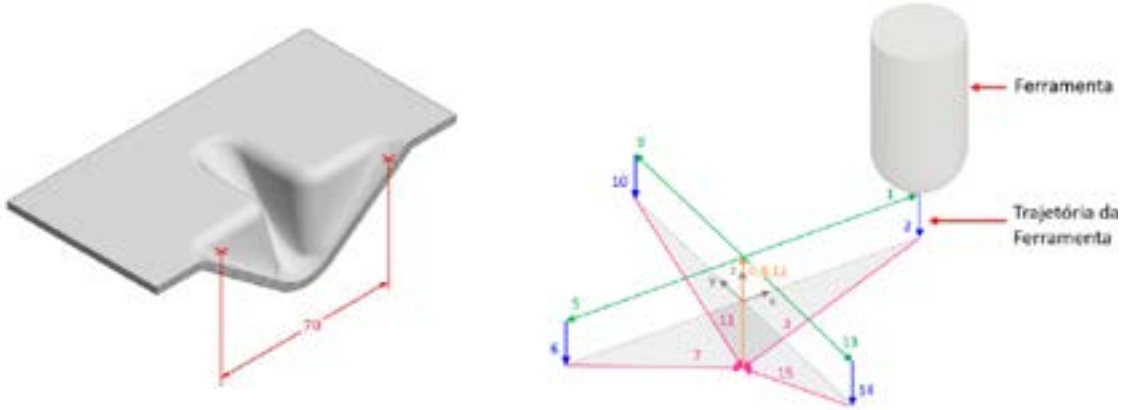
A geometria de hiperboloide foi conformada com diâmetro inicial de 70 mm e raio lateral de 60 mm (Figura 3a). Este formato geométrico permite que, a cada incremento da ferramenta, seja gerado um novo ângulo de parede, promovendo um aumento gradativo do ângulo inicial θ_0 até um ângulo final θ, de modo que a chapa atinja sua espessura mínima s e ocorra a fratura do material em uma profundidade máxima h. Na Figura 3b é apresentada a trajetória da ferramenta para conformação do formato de hiperboloide, que consiste em movimentos verticais e horizontais, seguidos de movimentos circulares.



(a) (b)

Figura 3: Hiperboloide: Chapa conformada em corte (a) e Trajetória da ferramenta (b)

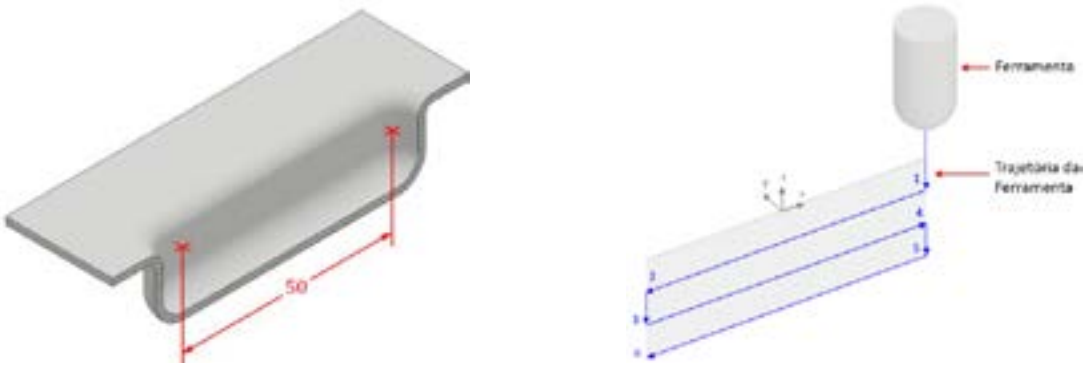
A geometria de canal cruzado em rampa foi conformada com largura de canal com 70 mm. Na Figura 4a é apresentada a geometria de canal cruzado por meio de uma vista de corte, enquanto na Figura 4b é apresentada a trajetória da ferramenta para conformação deste formato. A trajetória da ferramenta neste caso consiste em movimentos lineares, sendo que todos os incrementos para deformação da chapa são realizados em rampa.



(a) (b)

Figura 4: Canal cruzado em rampa: Chapa conformada em corte (a) e Trajetória da ferramenta (b)

A geometria de canal reto foi conformada com largura de canal com 50 mm. Na Figura 5a é apresentada a geometria de canal reto em uma vista de corte, enquanto na Figura 5b é apresentada a trajetória da ferramenta para conformação deste formato, que consiste em movimentos verticais e horizontais.



(a) (b)

Figura 5: Canal reto em rampa: Chapa conformada em corte (a) e Trajetória da ferramenta (b)

2.2 Simulação pelo Método de Elementos Finitos

Após a realização dos experimentos foi executada uma simulação pelo método de elementos finitos do formato de canal reto, utilizando o software *QForm UK*. O tipo de processo selecionado no software para a simulação foi “Conformação de chapas grossas”, que possibilita a redução do tempo de processamento com elementos hexaédricos.

Também com o objetivo de otimizar o tempo de simulação, foi empregado o recurso de espelhamento em relação ao plano de simetria do canal. A malha inicial foi composta por elementos sólidos quadrados de 0,8 mm de aresta com refinamento dinâmico de até 0,4 mm. A espessura da chapa foi dividida em 4 camadas.

O alumínio AA1200-H14, selecionado para a simulação, foi considerado isotrópico. A temperatura do processo foi considerada 20 ºC e o coeficiente de atrito foi selecionado no valor de 0,1, seguindo a lei de Coulomb.

As dimensões da ferramenta, da matriz, espessura da chapa, e valores de velocidade de avanço foram as mesmas aplicadas nos experimentos. A profundidade máxima da ferramenta na simulação foi de 8 mm, com base no valor de profundidade em que ocorreu a fratura nos experimentos de canal reto. O caminho da ferramenta foi configurado no software via tabela de movimentos. A Figura 6 apresenta os componentes utilizados na simulação em vista isométrica do conjunto.

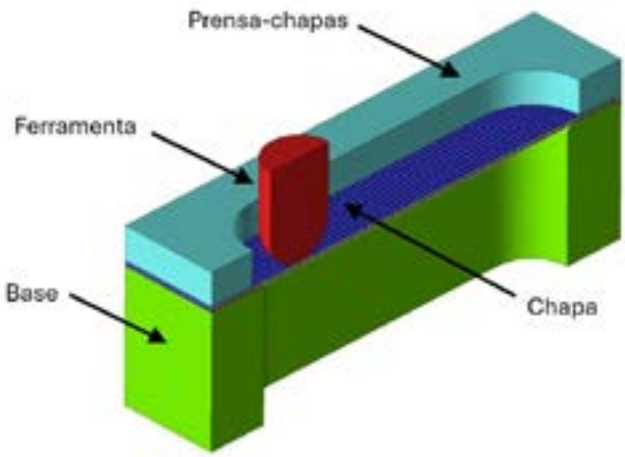


Figura 6: Componentes da simulação de elementos finitos

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Experimentos de Estampagem Incremental

Após a realização dos experimentos de estampagem incremental das chapas, foram realizadas as medições das elipses próximas ao local da fratura. As grades de círculos com diâmetro inicial de 1 mm gravadas a laser permitiram boa visualização para medição com escala flexível. A Figura 7 apresenta o local em que ocorreu a fratura em cada formato de peça, bem como a elipse selecionada para medição.

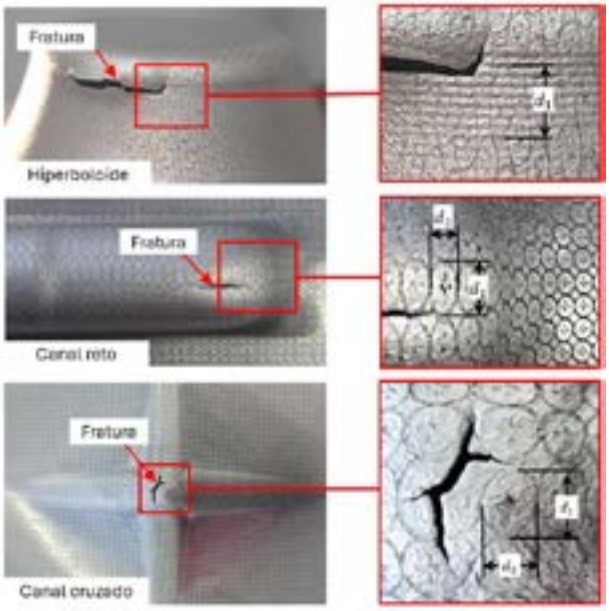


Figura 7: Região de fratura para cada formato e elipse selecionada para medição

Na Tabela 1 são apresentados os valores de deformação meridional (φ_1), circunferencial (φ_2) calculadas por meio das medições das elipses, bem como os valores de deformação em espessura (φ_3) calculada por meio da lei da constância de volume. A espessura final, calculada pela Equação 3, também é apresentada na Tabela 1. No caso do hiperboloide a deformação circunferencial é nula (estado plano de deformações), enquanto no canal cruzado as deformações meridional e circunferencial são aproximadamente iguais (estado de deformações com expansão biaxial).

Tabela 1: Resultados das deformações obtidas em cada experimento

Nº	Descrição	φ_1 (-)	φ_2 (-)	φ_3 (-)	s (mm)
1	Hiperboloide	1,562	0,000	-1,562	0,168
2	Hiperboloide	1,527	0,000	-1,527	0,174
3	Hiperboloide	1,509	0,000	-1,509	0,177
4	Canal reto	1,117	0,453	-1,570	0,166
5	Canal reto	1,114	0,552	-1,666	0,151
6	Canal reto	1,167	0,453	-1,620	0,158
7	Canal cruzado	0,801	0,764	-1,565	0,167
8	Canal cruzado	0,764	0,725	-1,489	0,180
9	Canal cruzado	0,764	0,725	-1,489	0,180

Com base na Tabela 1 é possível definir a espessura média para estes experimentos como $s = 0{,}169\ mm$, com variação percentual de 6,7% acima e 10,6% abaixo da média. Esta pode ser definida como a espessura crítica para este material no processo de estampagem incremental, sendo realizada por meio dos parâmetros selecionados neste trabalho. Esta variação dimensional no valor de espessura, encontrada entre os experimentos, pode ser atribuída ao método de determinação das deformações, já que na estampagem incremental são obtidas grandes deformações, como no terceiro experimento foi obtido o valor de deformação meridional $\varphi_1 = 1{,}562$, o que equivale a uma variação da grade de 1 mm para 4,768 mm. Deste modo a deformação avaliada está distribuída em uma grande região.

A utilização de uma grade de círculos de menor diâmetro contribuiria para obtenção de valores mais precisos. Do *et al.* [14] recomendam uma razão de 50 entre o diâmetro da ferramenta e o tamanho da grade de círculos. Embora neste trabalho tenha sido adotada uma razão de 10, a RLC obtida apresenta características semelhantes.

Outro aspecto importante na avaliação da visioplasticidade é o fato de que nos formatos de canal reto e de canal cruzado, a área de análise das deformações é relativamente pequena, sendo função do raio da ferramenta. Enquanto que no caso do formato de hiperboloide toda a circunferência da peça pode ser analisada, independentemente do tamanho da ferramenta utilizada, o que facilita a medição.

Com base nos valores de deformação obtidos em cada experimento foi definida a RLC, conforme indicada na Figura 8. A equação da RLC foi definida como $\varphi_1 = -0{,}990\varphi_2 + 1{,}551$. Este resultado confirma os achados de Do *et al.* [14] que obteve coeficientes angulares de −1,04 para Al5052-O, -1,03 para STS304, -1,02 para Al3000 e de -0,98 para titânio puro. Estes resultados indicam que apenas um formato poderia ter sido utilizado para definição da RLC.

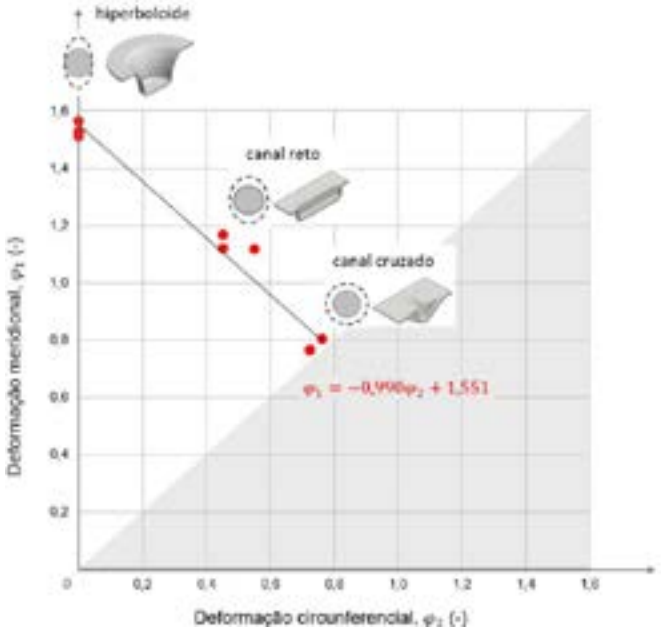


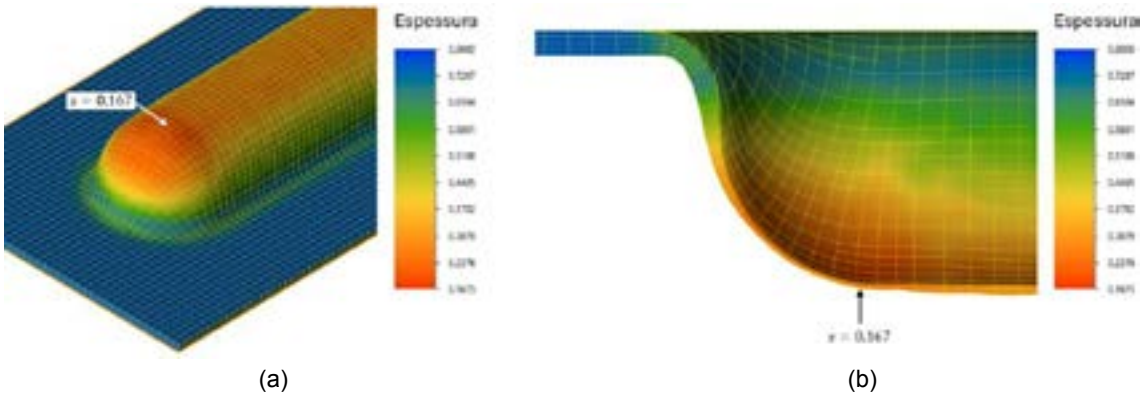
Figura 8: RLC determinado por três formatos diferentes

3.2 Simulação pelo Método de Elementos Finitos

Por meio da simulação de elementos finitos foi possível confirmar os resultados experimentais, que indicaram que as regiões críticas no ensaio do canal ocorrem nas extremidades, onde foram obtidas as menores espessuras, conforme mostrado na Figura 9(a).

A espessura mínima verificada na simulação foi de 0,167 mm, com erro percentual de 5,5% em relação à espessura média obtida nos experimentos de canal reto. Neste mesmo ponto foram coletados valores de deformação meridional de 1,258 e deformação circunferencial de 0,473 na simulação.

A Figura 9(b) apresenta uma vista em corte da região do canal onde foi verificada a menor espessura da chapa, bem como o afinamento gradual do material em função da profundidade do canal.



(a) (b)

Figura 9: Variação de espessura da chapa na simulação do canal:
Vista isométrica inferior (a) vista em corte (b)

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram realizados 9 experimentos de estampagem incremental em chapas de alumínio AA1200-H14 com espessura inicial 0,8 mm, para obtenção da RLC. Após a conformação das peças, os valores de espessura final e de deformação foram obtidos por visioplasticidade, permitindo a construção da RLC. Adicionalmente, foi realizada simulação numérica no software QForm UK para validação dos resultados experimentais. Com base nessas análises, podem-se destacar as seguintes conclusões:

- O fato de o coeficiente angular da RLC do AA1200-H14 ser próximo de -1 implica que a curva pode ser determinada a partir de ensaios com um único formato de corpo de prova;
- Entre os formatos utilizados para determinação da RLC, o de hiperboloide apresenta maior área para medição das deformações, independentemente do raio de ferramenta utilizado;
- As variações obtidas entre os resultados experimentais podem ser atribuídas ao tamanho da grade de círculos, utilizada na medição das deformações por visioplasticidade;

- Os resultados da simulação confirmaram que as extremidades do canal são as regiões críticas para o formato de canal, apresentando um erro percentual de apenas 5,5% no valor da espessura mínima em relação ao valor experimental.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao IFSC pelo auxílio financeiro prestado para realização deste trabalho por meio do edital 03/2024 PROPPI/DAE.

REFERÊNCIAS

[1] Amino M, Mizoguchi M, Terauchi Y, Maki T. Current status of “Dieless” Amino’s incremental forming. Procedia Eng 2014;81:54–62. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.09.128.

[2] Li Y, Chen X, Liu Z, Sun J, Li F, Li J, et al. A review on the recent development of incremental sheet-forming process. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 2017;92:2439–2462. https://doi.org/10.1007/s00170-017-0251-z.

[3] Scheffler S, Pierer A, Scholz P, Melzer S, Weise D, Rambousek Z. Incremental sheet metal forming on the example of car exterior skin parts. Procedia Manuf 2019;29:105–11. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.112.

[4] Peter I, Fracchia E, Canale I, Maiorano R. Incremental sheet forming for prototyping automotive modules. Procedia Manuf 2019;32:50–8. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.182.

[5] Trzepiecinski T, Krasowski B, Kubit A, Wydrzynski D. Possibilities of Application of Incremental Sheet-Forming Technique in Aircraft Industry. Scientific Letters of Rzeszow University of Technology - Mechanics 2018:87–100. https://doi.org/10.7862/rm.2018.08.

[6] Barimani-Varandi A, Nasrabadi MK, Ravan BA, Javadi M. Rapid prototyping of aircraft canopy based on the incremental forming process. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering 2021;43:1–15. https://doi.org/10.1007/s40430-021-02811-1.

[7] Castelan J, Schaeffer L, Daleffe A, Fritzen D, Salvaro V, Da Silva FP. Manufacture of custom-made cranial implants from DICOM® images using 3D printing, CAD/CAM technology and incremental sheet forming. Revista Brasileira de Engenharia Biomedica 2014;30:265–73. https://doi.org/10.1590/rbeb.2014.024.

[8] Ambrogio G, Palumbo G, Sgambitterra E, Guglielmi P, Piccininni A, De Napoli L, et al. Experimental investigation of the mechanical performances of titanium cranial prostheses manufactured by super plastic forming and single-point incremental forming. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 2018;98:1489–503. https://doi.org/10.1007/s00170-018-2338-6.

[9] De Lucca GDS, Ferreira CA, Daleffe A, Fritzen D, Castelan J, Santos R, et al. Investigation of photofunctionalization applied to cranial implants produced by incremental sheet forming (ISF). Journal of Materials Research and Technology 2021;15:2633–45. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.09.059.

[10] de Arruda RP, Baroni A, Schaeffer L. Sheet metal forming: new technologies applied to the fabrication of solar energy collector panels. International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems 2008;1:254–63. https://doi.org/10.1504/IJMMS.2008.02051.

[11] Schreiber RG, Schaeffer L. Manufacture of absorber fins for solar collector using incremental sheet forming. Journal of Materials Research and Technology 2019;8:1132–40. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.07.018.

[12] Schreiber RG, Teixeira AR, Pereira RSF, Osório F da S, Schaeffer L. Prototyping of absorber plate for solar collector by ISF and FSW processes. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering 2021;43. https://doi.org/10.1007/s40430-021-03083-5.

[13] Kalo A, Newsum MJ. An Investigation of Robotic Incremental Sheet Metal Forming as a Method for Prototyping Parametric Architectural Skins. Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2014, Springer International Publishing; 2014, p. 33–49. https://doi.org/10.1007/978-3-319-04663-1_3.

[14] Do V-C, Pham Q-T, Kim Y-S. Identification of forming limit curve at fracture in incremental sheet forming. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 2017. https://doi.org/10.1007/s00170-017-0441-8.

[15] Martins PAF, Bay N, Skjoedt M, Silva MB. Theory of single point incremental forming. CIRP Ann Manuf Technol 2008;57:247–52. https://doi.org/10.1016/j.cirp.2008.03.047.

[16] Martins PAF, Bay N, Skjoedt M, Silva MB. Theory of single point incremental forming. CIRP Ann Manuf Technol 2008;57:247–52. https://doi.org/10.1016/j.cirp.2008.03.047.

[17] Schreiber RG, Araldi A, Kiniz Júnior M, Daleffe A, Schaeffer L. Failure criterion for SPIF based on mean stress. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering 2022;44. https://doi.org/10.1007/s40430-022-03508-9.

[18] Khazaali H, Fereshteh-Saniee F. An Inclusive Experimental Investigation on Influences of Different Process Parameters in Warm Incremental Forming of AZ31 Magnesium Sheets. Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Mechanical Engineering 2019;43:347–58. https://doi.org/10.1007/s40997-017-0122-0.

[19] Schreiber RG, Schaeffer L. Manufacture of absorber fins for solar collector using incremental sheet forming. Journal of Materials Research and Technology 2019;8:1132–40. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.07.018.

[20] Schreiber RG, Mondo LSS, Teixeira AR, Daleffe A, Schaeffer L. Predicting maximum force in SPIF for different materials. Revista Materia 2022;27. https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2022-0230.

44º SENAFOR

28ª Conferência Internacional de Forjamento - Brasil
14ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas / 11º Congresso do BrDDRG
14ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis
3ª Conferência Internacional de Inovação em Materiais e Manufatura
Porto Alegre, RS, dias 1, 2 e 3 de outubro de 2025
www.senafor.com

DESENVOLVIMENTO DA LIGA 51CrV4 NA LAMINAÇÃO DE HELICOIDES PARA TRANSPORTADORES DE GRÃOS

Daniel Augusto Ferro [1]
Thomas Frank [2]

RESUMO

Os helicoides usados em transportadores de grãos são peças soldadas em um eixo rotativo e montadas dentro de um tubo, transportando material de um ponto a outro. Sofrem elevada conformação a frio e precisam de boa resistência ao desgaste no transporte de materiais abrasivos.

As ligas usadas atualmente são SAE 1006, que pode passar por processo de cementação seguida de têmpera ou metalização, e a liga 27MnCrB5 pós temperada para aumento da dureza e resistência ao desgaste.

Para elevar a resistência ao desgaste dos helicoides, foi desenvolvida a liga 51CrV4 relaminada, de modo que a estrutura e propriedades mecânicas permitissem o grau de conformação aplicado no processo. Foi possível atingir propriedades mecânicas (LR – 504 MPa, LE – 404 MPa e Al80 – 22,5%) e microestrutura 100% coalescida, permitindo a conformação sem a presença de trincas nas bordas, mesmo com uma redução de espessura da ordem de 60% na borda externa do helicoide. Posteriormente ao processo de conformação, foi realizada a têmpera sendo obtidas durezas médias de 61 HRC na borda externa, em seguida o helicoide foi soldado no eixo rotativo do transportador de grãos para os testes de campo, ainda em andamento para quantificar a vida útil do helicoide produzido com a liga 51CrV4.

Palavras-chave: Helicoide transportador, Liga 51CrV4, Conformação, Resistência ao Desgaste.

[1] Engenheiro Mecânico pelo Instituto Mauá de Tecnologia, Mestre em Ciência dos Materiais pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Especialista em Desenvolvimento de Processo e Produto da Waelzholz Brasmetal (daniel.ferro@waelzholz.com);

[2] Engenheiro de Materiais pela FEI, Supervisor de Assistência Técnica e Desenvolvimento de Produto da Waelzholz Brasmetal (thomas.frank@waelzholz.com).

1. INTRODUÇÃO

O transportador helicoidal é um dos meios de transporte a granel mais antigos que existem. Registros históricos creditam sua invenção ao matemático grego Arquimedes em 250 a.C., porém até os dias de hoje é um sistema amplamente utilizado devido sua construção simples e robusta [1]. A versão moderna deste tipo de transportador é composta principalmente por mancais, buchas, eixo, parafusos do acoplamento, motor elétrico e uma estrutura externa conforme é apresentado na figura 1.

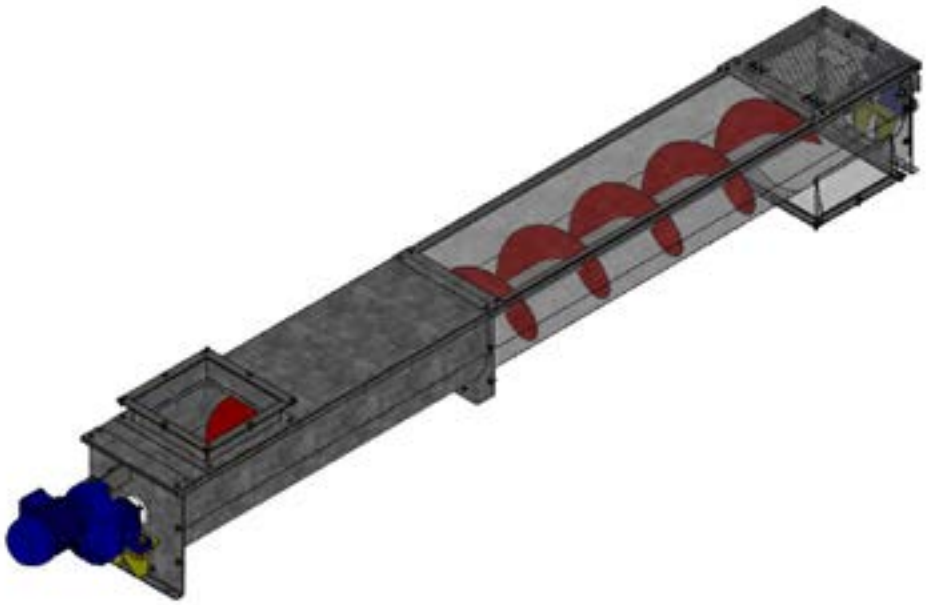


Figura 1: Imagem ilustrativa de um transportador helicoidal moderno [2].

Esses transportadores funcionam com o motor elétrico girando o eixo onde o helicoide é soldado, promovendo o transporte do material a granel de um ponto a outro como uma rosca sem-fim.

Devido à necessidade do mercado agrícola de transporte de grãos com maior eficiência e menor tempo para troca de peças de desgaste, como o helicoide, com o passar do tempo foram desenvolvidas ligas e processos alternativos para aumento da resistência ao desgaste do mesmo. Atualmente são usadas as ligas SAE 1006 podendo ou não passar pelos processos de cementação seguida de têmpera ou metalização por aspersão térmica, geralmente com carbeto de silício ou tungstênio para aumento da resistência ao desgaste. Outra liga amplamente utilizada é a 27MnCrB5 com processo de têmpera posteriormente a conformação do helicoide.

2. OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo aplicar a liga 51CrV4 para produção de helicoides empregados em transportadores, onde a elevada resistência ao desgaste é primordial no aumento da vida útil. Espera-se uma redução do desgaste do helicoide com o uso da liga 51CrV4 em comparação com as ligas atualmente utilizadas no mercado, principalmente no transporte do arroz, que apresenta elevada abrasividade devido a grande quantidade de sílica na composição de sua casca [3].

Os principais desafios para o sucesso do projeto são: (i) a necessidade de alta ductilidade da liga 51CrV4 para permitir a laminação do helicoide, com redução de

espessura em torno de 60% na borda externa; (ii) o processo de têmpera do helicoide conformado visando a elevação da dureza e consequente aumento da resistência ao desgaste e (iii) a montagem e soldagem do helicoide no eixo rotor sem a presença de quebra durante este processo.

3. MATERIAIS

Para o desenvolvimento realizado, foi adquirida uma bobina laminada a quente com liga especificada 51CrV4 com composição química conforme norma DIN EN 10132:2021-11 [4]. A tabela 1 mostra a composição química encontrada e a faixa especificada que consta na norma DIN.

Tabela 1: Composição química encontrada/especificada para a liga 51CrV4 conforme norma DIN EN 10132: 2021-11 [4].

	C (%)	Mn (%)	Si (%)	P (%)	S (%)	Cr (%)	V (%)	Mo (%)	Ni (%)
Bobina	0,54	0,86	0,21	0,019	0,007	0,99	0,16	0,0045	0,0164
DIN EN 10132	0,47 a 0,55	0,70 a 1,10	0,40 máx.	0,025 máx.	0,025 máx.	0,90 a 1,20	0,10 a 0,25	0,10 máx.	0,40 máx.

O material laminado a quente passou pelo processo de relaminação a frio para ajuste dimensional, esferoidização da cementita e redução das propriedades mecânicas. Posteriormente, foi aplicado novo processo de laminação a frio para formação do helicoide, com passo e diâmetro interno definidos em desenho.

Após processo de relaminação, foi coletada amostra do aço plano para ensaios mecânicos conforme norma NBR 6673:2023 [5], com resultados de propriedade mecânica e gráfico de tração conforme tabela 2 e figura 2 respectivamente:

Tabela 2: Propriedades mecânicas encontradas no ensaio de tração realizado em amostra do aço plano da liga 51CrV4 após processo de relaminação e especificação no estado recozido com skin pass conforme norma DIN EN 10132:2021-11 [4].

	Limite de Resistência (MPa)	Limite de Escoamento (MPa)	Alongamento base 80 (%)	Expoente de encruamento n
Amostra do aço plano 51CrV4	504	404	22,5	0,106
Especificado (recozido com skin pass)	700 máx.	550 máx.	13 mín.	Não especificado

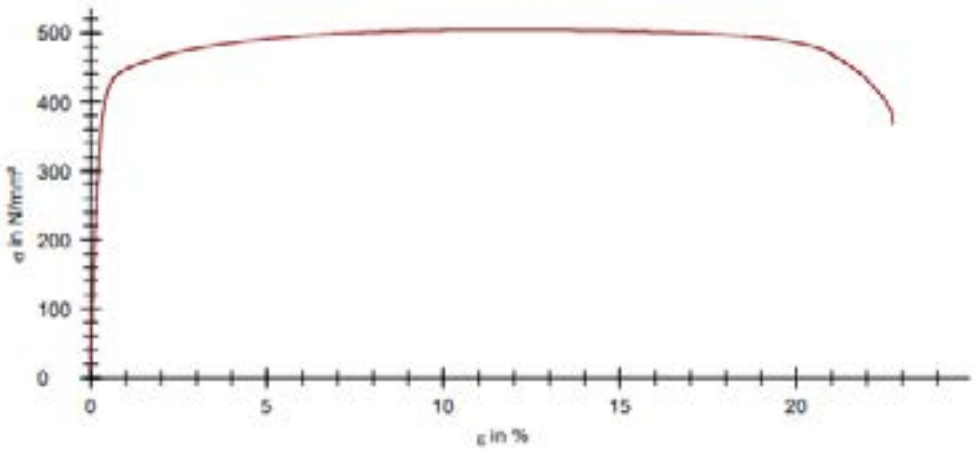


Figura 2: Gráfico de tração realizado na amostra do aço plano 51CrV4 após relaminação.

Na mesma amostra foi avaliada a microestrutura quanto a nível de inclusões sendo encontradas inclusões do tipo C (silicato) nível 1 série fina e D (óxido globular) nível 2 série fina conforme norma ASTM E45:2018 [6] e grau de coalecimento 3.0 de acordo com norma SEP 1520:1998 [7], figuras 3 e 4 respectivamente:

Figura 3: Nível de inclusões tipo C (silicato) nível 1 série fina e tipo D (oxido globular) nível 2 série fina na amostra da liga 51CrV4, aumento de 100x sem ataque conforme ASTM E45 [6].

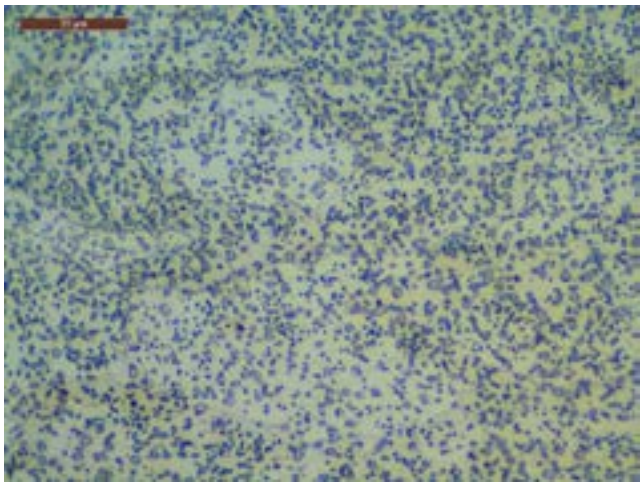


Figura 4: Classificação do nível de coalecimento da liga 51CrV4 após relaminação, aumento de 1.000x e ataque nital 3% conforme SEP 1520:1998 [7].

4. MÉTODO

4.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA

Para a preparação do corpo de prova, foi cortada uma amostra da bobina processada com posterior lixamento da superfície para eliminar qualquer erro na medição da porcentagem de carbono devido possível trecho com descarbonetação.

A composição química foi realizada em Espectrofotômetro de Emissão Óptica da marca Spectrolab.

4.2 DUREZA

Para as análises de dureza, foi utilizado durômetro da marca Wilson modelo UH4250, foram avaliadas durezas na superfície do helicoide na escala HRB com carga de 100kgf e penetrador de esfera de aço em pontos da seção transversal do helicoide com espessuras de 2mm, 3,70mm e 5,90mm após processo de conformação conforme mostrado na figura 5:

Figura 5: Pontos da seção do helicoide com medição de dureza HRB na superfície.

Também foi realizado ensaio de microdureza Vickers com carga de 1kg e penetrador piramidal de diamante ao longo da seção da espessura do helicoide já temperado nos trechos A, B e C. As medidas de dureza foram tomadas a distâncias de 0,1, 0,2, 0,3, 0,4, 0,5, 0,6 e 1mm da borda externa do helicoide e posteriormente foram convertidas para a escala HRC, conforme exemplificado na figura 6:

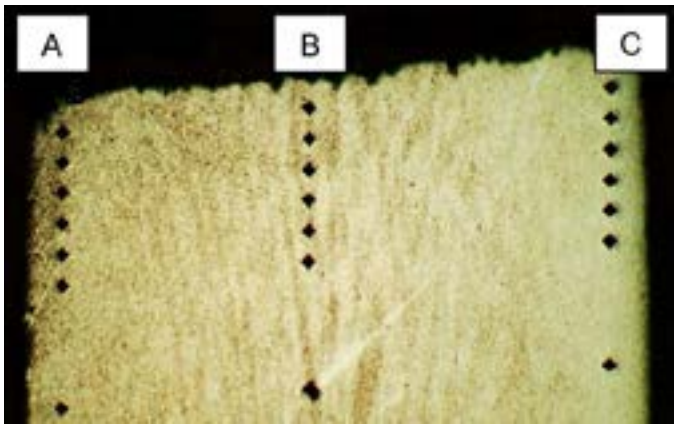


Figura 6: Pontos da seção transversal do helicoide produzido com a liga 51CrV4 após tratamento térmico com medição de microdureza em Vickers e conversão para a escala HRC.

4.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS

As propriedades mecânicas foram obtidas conforme norma NBR 6673:1981 [5]. Foi retirado um corpo de prova de tração paralelo ao sentido de laminação da liga 51CrV4 após processo de relaminação e antes da formação do helicoide.

Os ensaios foram realizados em máquina de tração Zwick modelo Z250 com carga máxima de 250 kN equipada com garras hidráulicas e extensômetro.

4.4 MICROSCOPIA ÓPTICA

Análise da microestrutura foi realizada em uma amostra da liga 51CrV4 após relaminação e antes da formação do helicoide. A amostra foi devidamente polida para análise de inclusões e posteriormente atacada com reagente nital 3% para visualização do grau de coalecimento, conforme ilustra a figura 7.

Figura 7: Ilustração da amostragem para avaliação do nível de inclusões e grau de coalecimento na liga 51CrV4 após processo de relaminação e antes da formação do helicoide.

A verificação da microestrutura foi feita com uso de microscópio do fabricante Leica com capacidade de ampliação de até 1.000x.

5. RESULTADOS DOS TESTES DE CONFORMAÇÃO DO HELICOIDE

O material produzido foi enviado ao fabricante do helicoide onde passou por um processo de laminação a frio com cilindros cônicos gerando o formato do helicoide conforme figuras 8, 9 e 10:

Figura 8: Trecho do material antes e após conformação do helicoide.

Figura 9: Perfil de espessura e dureza na borda externa (lado esquerdo), meio e borda interna (lado direito) após laminação do helicoide e antes do tratamento térmico de têmpera.

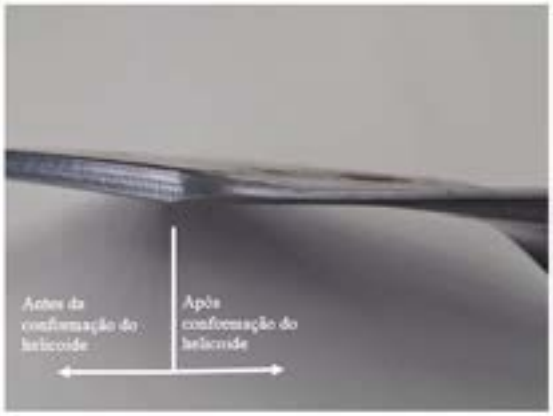


Figura 10: Condição da borda externa antes e após conformação do helicoide.

6. RESULTADOS DE DUREZA DA LIGA 51CRV4 APÓS TÊMPERA DO HELICOIDE

Após processo de têmpera do helicoide, foi possível verificar valor médio de dureza de aproximadamente 61 HRC em trecho de menor espessura (maiores taxas de aquecimento e resfriamento), sendo o ponto de maior dureza após tratamento térmico conforme é possível observar na tabela 3:

Tabela 3: Resultados de microdureza convertidos em HRC na seção transversal do helicoide nos trechos A, B e C a diferentes distâncias da borda.

Dureza HRC da liga 51CrV4 após têmpera			
Distância da borda externa (mm)	**A**	**B**	**C**
0,1	58,7	61	61,1
0,2	61,3	61,4	61
0,3	60,5	61,3	60,1
0,4	61,6	61,5	61,3
0,5	61,4	61,2	61,2
0,6	62,2	61,4	60,5
1,0	61,1	57,9	60,8
média	61	60,8	60,9

7. DISCUSSÃO

Com o processo de relaminação empregado, foi possível obter um alto grau de coalecimento e redução das propriedades mecânicas, o que eleva consideravelmente a ductilidade da liga 51CrV4 e permite a absorção de toda a deformação aplicada no processo de conformação durante laminação a frio do helicoide.

O processo de têmpera do helicoide produzido com a liga 51CrV4 obteve durezas da ordem de 61 HRC próximo a borda externa, sendo que a faixa de dureza atingida atualmente com a liga 27MnCrB5 após têmpera fica entre 44 e 50 HRC. Isso se dá principalmente devido a composição química mais carregada na liga 51CrV4 em comparação a liga 27MnCrB5.

Mesmo com durezas da ordem de 61 HRC na borda externa do helicoide, foi possível a soldagem do mesmo no eixo do transportador sem a presença de trincas.

A elevação de dureza após têmpera obtida com o uso da liga 51CrV4, deve resultar em aumento expressivo na resistência ao desgaste do helicoide e consequentemente a redução da frequência de troca deste componente em campo.

8. CONCLUSÕES

A produção do helicoide a partir da liga 51CrV4 se mostrou viável durante processo de relaminação, conformação do helicoide, têmpera e soldagem do helicoide no eixo rotativo do transportador de grãos.

A dureza após têmpera do helicoide fabricado com a liga 51CrV4, mostrou resultados superiores (61 HRC em média), se comparado ao helicoide produzido com a liga 27MnCrB5 (máximo 50 HRC), resultando provavelmente em uma maior resistência ao desgaste.

Testes de durabilidade do helicoide em campo serão feitos com o intuito de confirmar os resultados encontrados durante este desenvolvimento. Resultados destes testes serão tema de futuros trabalhos.

AGRADECIMENTO

Os autores do trabalho agradecem a empresa Waelzholz Brasmetal, pela disponibilização dos recursos que tornaram o desenvolvimento do projeto possível.

Agradecimento especial ao Sr. Ewerton Pereira pelo auxílio durante a revisão do presente trabalho.

REFERÊNCIAS

[1] Solutec Industrial. Transportador Helicoidal. Solutec Industrial, 13/09/2021. Disponível em: https://solutecindustrial.com.br/transportadores-helicoidais-2/. Acesso em: 05 jun. 2025.

[2] Becker Metalúrgica. Transportador Helicoidal. [Imagem]. 2022. Disponível em https://www.becker-sa.com/produtos/transportador-helicoidal/. Acesso em: 08 jun. 2025.

[3] LUZ, Maria Laura Gomes Silva da; ARAÚJO, Ádamo de Sousa. *Manutenção em unidades de beneficiamento de grãos e sementes*. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2024. Disponível em: https://www.google.com.br/books/edition/Manuten%C3%A7%C3%A3o_em_unidades_de_beneficiamen/twtIEQAAQBAJ?hl=pt-BR&gbpv=1&dq=abrasividade+da+casca+de+arroz&pg=RA2-PT30&printsec=frontcover. Acesso em: 01 jun. 2025.

[4] **DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG**. *DIN EN 10132:2021-11 – Cold rolled narrow steel strip for heat treatment – Technical delivery conditions*. Berlin: Beuth Verlag, 2021. p. 15-18.

[5] **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS**. NBR 6673:2023 – *Produtos planos de aço – Determinação das propriedades mecânicas a tração*. Rio de Janeiro: ABNT, 2023. p. 1-14.

[6] **AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS**. ASTM E45:2018 – *Standard Test Method for Determining inclusion content of steel*, West Conshohocken: ASTM International, 2018. p.1-20.

[7] **VEREIN DEUTSCHER EISENHÜTTENLEUTE**. SEP 1520:1998 – *Microscopic examination of carbide structure in steels by means of diagram series*. Düsseldorf: VDEh, 1998. p. 8-9.

44º SENAFOR

28ª Conferência Internacional de Forjamento - Brasil
14ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas / 11º Congresso do BrDDRG
14ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis
3ª Conferência Internacional de Inovação em Materiais e Manufatura
Porto Alegre, RS, dias 1, 2 e 3 de outubro de 2025
www.senafor.com

ESTUDO DA ESTAMPAGEM INCREMENTAL EM CHAPAS DE ALUMÍNIO PARA VALIDAÇÃO GEOMÉTRICA DE CANAIS APLICADOS NA FABRICAÇÃO DE PLACAS ABSORVEDORAS DE CALOR PARA COLETORES SOLARES

Gilson de March [1]
Lírio Schaeffer [2]
Anderson Daleffe [3]
Daniel Fritzen [4]
Henrique Cechinel Casagrande [5]
Morvan Antônio Américo [6]
Pedro Henrique Possamai [7]

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo investigar a viabilidade técnica da estampagem incremental de ponto simples (Single Point Incremental Forming – SPIF) na conformação de canais em chapas de alumínio, com foco na fabricação de placas absorvedoras de calor em coletores solares. Para validar o desempenho do material no processo de conformação, foram realizados ensaios de conformação mecânica, com destaque para o ensaio de Nakajima e o processo SPIF, permitindo a construção da Curva Limite de Conformação (CLC). A caracterização da deformação plástica será conduzida por meio da técnica de visioplasticidade, utilizando marcação por círculos para análise do alongamento das elipses após o processo de estampagem. O material estudado foi a liga alumínio 1200 H14 (ASTM/ABNT), considerada adequada para aplicações térmicas pela sua alta condutividade e boa conformação. Os resultados forneceram subsídios para a seleção de parâmetros operacionais e validação geométrica de canais conformados, contribuindo para o desenvolvimento de soluções leves, eficientes e de baixo custo para o setor de energia solar.

Palavras-chave: Alumínio 1200 H14; Estampagem incremental; Curva limite de conformação; Coletores solares.

[1] Doutorando, UFRGS, E-mail: gilson.march@satc.edu.br
[2] Prof. Dr., UFRGS, E-mail: schaefer@ufrgs.br
[3] Prof. Dr., UNISACT, E-mail: anderson.daleffe@satc.edu.br
[4] Prof. Dr., UNISACT, E-mail: daniel.fritzen@satc.edu.br
[5] Doutorando, UFSC, E-mail: henrique_cechinel@hotmail.com
[6] Mestrando, UNISATC, E-mail: morvan.americo@satc.edu.br
[7] Mestrando, UNISATC, E-mail: pedro.possamai@satc.edu.br

1. INTRODUÇÃO

Diante dos desafios atuais da indústria em reduzir custos e otimizar processos com flexibilidade e eficiência energética, a aplicação de novos materiais e tecnologias tem sido uma estratégia recorrente. Neste cenário, destaca-se a Estampagem Incremental de Chapas (Incremental Sheet Forming – ISF), processo que vem ganhando destaque por permitir a produção de geometrias complexas sem a necessidade de ferramentas específicas, sendo amplamente aplicada em prototipagem e pequenas séries [1]; [2]; [3]; [4].

A ISF apresenta vantagens relevantes quando comparada à conformação convencional, como a eliminação de moldes rígidos, baixo custo operacional, alta taxa de conformabilidade e viabilidade para ajustes geométricos rápidos [5]; [6]. Estas características a tornam ideal para aplicações com geometrias variáveis, como implantes biomédicos, peças automotivas especiais e, mais recentemente, componentes para coletores solares térmicos [3]; [7].

O presente estudo tem como foco a aplicação da ISF para conformar canais diretamente em chapas de alumínio ASTM/ABNT 1200 H14 com espessuras de 1,5 mm, substituindo as tradicionais serpentinas de cobre empregadas nos coletores solares planos. A liga 1200 H14 é composta por aproximadamente 99% de alumínio, apresentando elevada condutividade térmica, boa resistência à corrosão e excelente conformabilidade, além de ser leve e economicamente viável [3]; [8]; [9]; [20]; [21]. Essas propriedades tornam o material promissor para aplicações térmicas que demandam alta eficiência de transferência de calor.

No contexto energético, o Brasil destaca-se como uma das nações com maior potencial de geração de energia solar, devido à elevada radiação global média em seu território [9]; [10]. Estima-se que cerca de 25% da energia elétrica consumida em residências brasileiras seja destinada ao aquecimento de água, o que reforça a importância de tecnologias térmicas mais acessíveis e sustentáveis, como os coletores solares planos [11]; [12].

No entanto, os modelos convencionais de coletores empregam tubos de cobre soldados à placa absorvedora, processo que eleva os custos e limita o aproveitamento térmico em virtude do contato parcial entre os elementos [13]; [14]. A aplicação da ISF neste contexto propõe a formação de canais diretamente na chapa, promovendo maior contato térmico com o fluido e reduzindo etapas de fabricação como corte, dobra e solda. Estudos recentes apontam que essa abordagem é capaz de manter ou até melhorar a eficiência térmica do sistema, ao mesmo tempo em que reduz significativamente o uso de materiais caros e etapas manuais de fabricação [15]; [16]; [17].

Dessa forma, o objetivo deste artigo é investigar a viabilidade técnica da estampagem incremental na fabricação de canais em chapas de alumínio para coletores solares térmicos, com ênfase na caracterização do material, definição da Curva Limite de Conformação (CLC), Linha de Fratura de conformação (FLC) e validação geométrica dos canais conformados. A metodologia inclui experimentos com diferentes geometrias (cone e pirâmide), ensaio de tração e o método de Nakajima para mapeamento das deformações, bem como testes comparativos de desempenho térmico entre os coletores produzidos.

2. MATERIAIS E MÉDODOS

O trabalho a seguir abordara as principais etapas do processo estudado.

2.1 ESTAMPAGEM INCREMENTAL

Foram avaliados dois modelos geométricos, pirâmide e cone, ambos com perfil radial, para determinação do ângulo máximo de conformação (Ψ), conforme utilizado por Fritzen [18]. Realizaram-se doze ensaios, seis por formato, variando o incremento vertical entre 0,2 mm e 0,5 mm, possibilitando a comparação entre diferentes parâmetros de conformação

A criação dos modelos 3D para estampagem foi realizada no software SolidWorks®, com base nas especificações apresentadas na Figura 1.

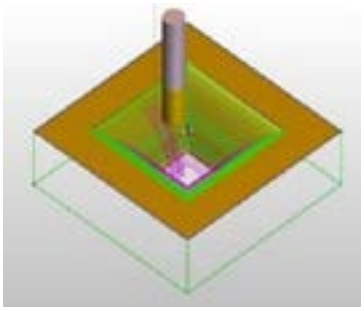


Figura 1: Estratégia da ferramenta.

2.2 FABRICAÇÃO DA PLACA DO COLETOR SOLAR

Foram conformadas placas com três e cinco canais paralelos, utilizando estratégias central e de contorno conforme figura 2. O processo seguiu o mesmo método aplicado às geometrias de pirâmide e cone, empregando lubrificante VG 68 para reduzir o atrito durante a estampagem incremental.

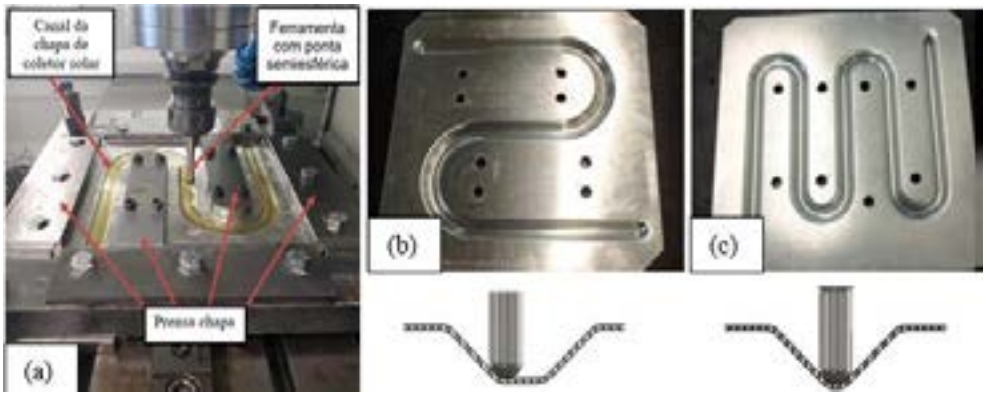


Figura 2: Configuração de diferentes canais: (a) Fabricação da chapa em centro de usinagem; (b) Três canais retos de contorno; (c) Cinco canais retos no centro.

Adotou-se incremento vertical (Δz) paralelo de 0,5 mm, aplicado continuamente na trajetória da ferramenta, tanto no centro quanto no contorno dos canais, com profundidade de 10 mm. Para analisar a resistência do material, a repetição desse incremento foi realizada até o rompimento da peça, sendo os parâmetros operacionais apresentados na Tabela 01.

Tabela 01: Parâmetro estampagem canal.

Descrição	Valor
Incremento Vertical (Δ_z)	0,2 e 0,5mm
Velocidade de Avanço *(f)*	1.000mm/min
Rotação da ferramenta *(N)*	Livre
Perfil da geometria da parede: Circular	50mm

Fonte: do autor

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos neste estudo serão apresentados com o objetivo de avaliar os parâmetros aplicados na Estampagem Incremental.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA CHAPA DE ALUMÍNIO 1200 H14

A análise de espectrometria indicou concentração de alumínio ligeiramente inferior ao esperado e maior teor de chumbo (Pb), possivelmente decorrente de contaminação ou variação do método de análise, em comparação aos valores de composição aceitáveis para essa liga segundo a classificação da ABNT/ASTM, apresentados na Tabela 2 [8], [27].

Tabela 01: Análise química do Alumínio 1200 H14.

Composição Química do Alumínio 1200 H14								
Al (%)	Si (%)	Fe (%)	Zn (%)	Mn (%)	Cu (%)	Ti (%)	Pb (%)	Outros (%)
98,72	0,497	0,291	0,0039	0,002	0,128	0,01	0,194	0,1541

Fonte: do autor

3.2 ANÁLISE METALOGRÁFICA

A preparação da análise metalográfica exige a preparação cuidadosa da amostra, que deve ser submetida a etapas sequenciais de corte, lixamento, polimento e ataque químico, possibilitando a observação da microestrutura do material [30]. Ambas as amostras foram submetidas ao ataque químico da solução keller por tempo de 1s.

3.2.1 MICROESTRUTURA DA CHAPA ANTES DA ESTAMPAGEM

A figura 3 apresenta a micrografia da chapa laminada antes da estampagem incremental.

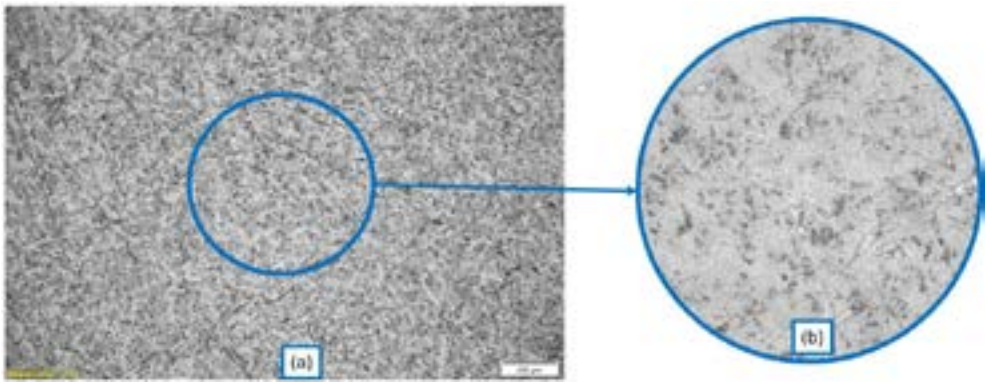


Figura 3: Imagem micrográfica da chapa antes da estampagem: (a) ampliada 100x; (b) ampliada 500x

Na imagem (a), observa-se a microestrutura do alumínio relativamente homogênea com partículas intermetálicas distribuídas de forma dispersa ao longo da superfície. Na imagem (b) ampliada 500x, permite detalhar melhor a morfologia das partículas intermetálicas, evidenciando sua forma irregular, contornos mais nítidos e regiões de possível segregação, como Fe, Si, Mn, e traços de Pb, confirmando os resultados de espectrometria de emissão óptica. A orientação alongada dos grãos reflete o efeito do processamento mecânico por laminação, característicos da condição de encruamento H14.

3.2.2 MICROESTRUTURA DA CHAPA APÓS A ESTAMPAGEM

A figura 4 apresenta a micrografia da chapa laminada antes da estampagem incremental.

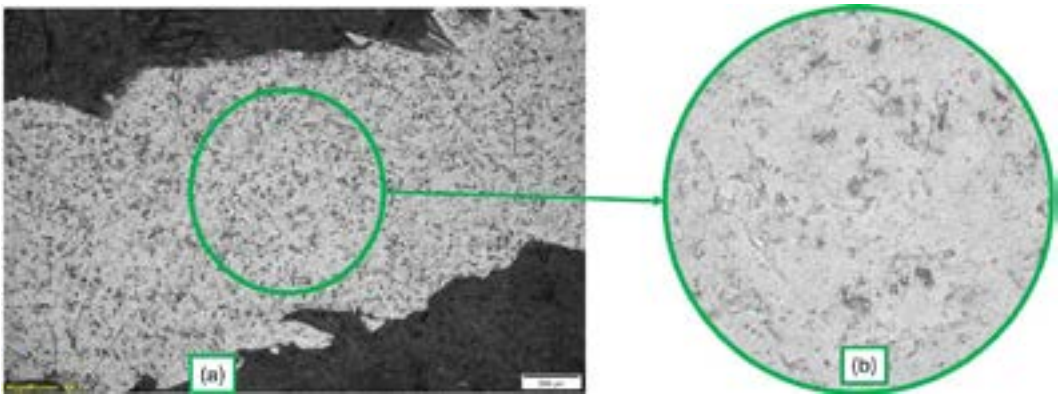


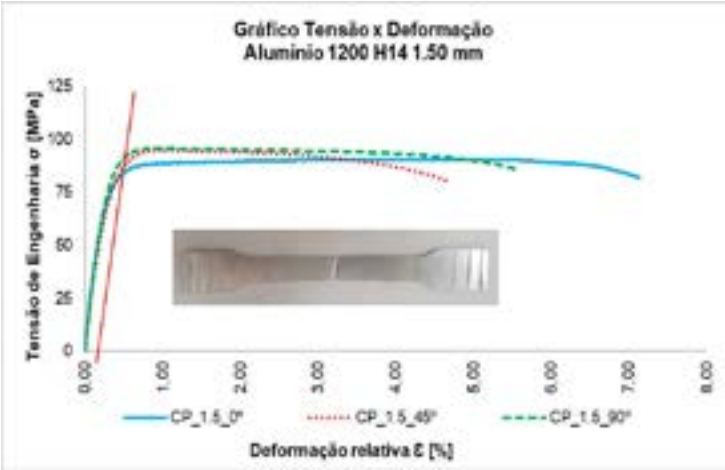
Figura 4: Imagem micrográfica da chapa após a estampada: (a) ampliada 100x; (b) ampliada 500x

A micrografia com aumento em 100x da figura (a), evidencia a matriz de alumínio com distribuição homogênea de partículas intermetálicas ao longo da superfície, visíveis como pontos e linhas escuras dispersas, enquanto a ampliação em 500x evidencia com clareza os contornos, formas irregulares e tamanhos distintos das partículas intermetálicas presentes no alumínio após a estampagem incremental.

3.3 ENSAIO DE TRAÇÃO

Os resultados das curvas tensão x deformação para as três direções (0°, 45° e 90°) indicam variações significativas no comportamento mecânico do material conforme figura 5.

Figura 5: Curva Tensão x Deformação média para os corpos de prova a 0º, 45º e 90º ao sentido de laminação.



Fonte: Do autor

A determinação da transição entre os regimes elástico e plástico em cada direção dos corpos de prova foi realizada pelo método do desvio de 0,2% na deformação relativa (Ɛ), traçando-se uma linha paralela à região elástica da curva tensão–deformação. O ponto de interseção define a tensão de escoamento (σ_e) do material [18]; [29].

A partir dos ensaios de tração, foram obtidos os parâmetros mecânicos de interesse, como deformação relativa (Ɛ), alongamento (δ), tensão máxima (σ_B) e a curva de escoamento, conforme apresentado na Tabela 2. O alongamento (δ) e a área inicial da seção (s_0) foram determinados por medições diretas na chapa, antes e após a fratura.

Tabela 2: Dados dos ensaios de tração 0º,45º e 90º com espessura de 1,5mm.

Orientação do corpo de prova	σB [MPa]	σe 0,2 [MPa]	ε [%]	δ [mm]
0º	90,48	85,09	7,1	5,71
45º	95,15	89,79	4.6	3,72
90º	95,84	92,75	5,6	4,48

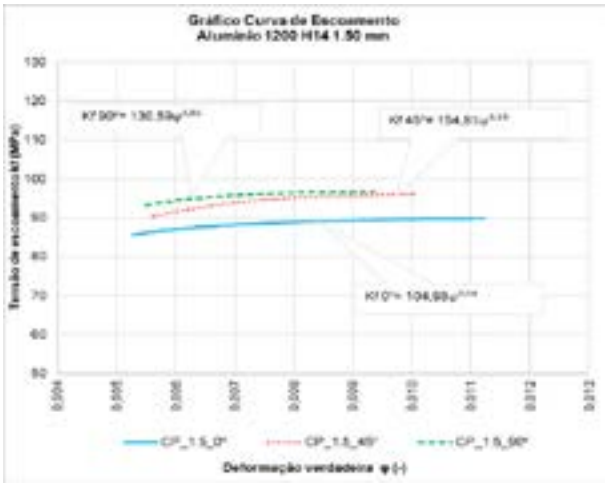
Fonte: Do autor

Verifica-se que a deformação mais acentuada ocorre ao longo da direção de laminação, em concordância com os resultados reportados por Teixeira [19], CBA [9], Donato [20], Cardoso [21], Lima [22] e Barros [23]. Esses achados evidenciam a relevância da orientação de laminação sobre o comportamento mecânico do material, influenciando diretamente sua resistência e capacidade de deformação, aspecto essencial para a otimização do processo de estampagem incremental.

3.3.1 Curva de Escoamento

A análise dos valores de tensão de escoamento (Kf) estão representados na figura 6 do alumínio 1200 H14 com 1,5mm de espessura, nos diferentes sentidos de laminação da chapa: 0º, 45º e 90º.

Figura 6: Curvas de escoamento em 0º, 45º e 90º no sentido de laminação.



Fonte: Do autor

Na Tabela 3 apresenta uma média de escoamento Kf = $130{,}17 \cdot \varphi^{0{,}07}$, demonstrando que o material mantém comportamento mecânico estável nas faixas de deformação analisadas. Esses resultados são essenciais para a previsão do desempenho do material em aplicações industriais, possibilitando maior controle sobre os parâmetros de conformação. A exposição dos valores de Kf_0 (tensão de escoamento inicial) e do coeficiente de encruamento (n) para cada orientação permite compreender detalhadamente o efeito da anisotropia no comportamento do material, informação essencial para a otimização de processos como a estampagem incremental.

Tabela 3: Propriedades mecânicas dos corpos de prova de 0º, 45º e 90º no sentido de laminação com s0 = 1,50 mm.

Orientação do corpo de prova	*Kf [MPa]*	*Kf_0 [MPa]*	*n*
0º	104,98	85,4	0,04
45º	154,95	90,29	0,10
90º	130,59	93,26	0,06

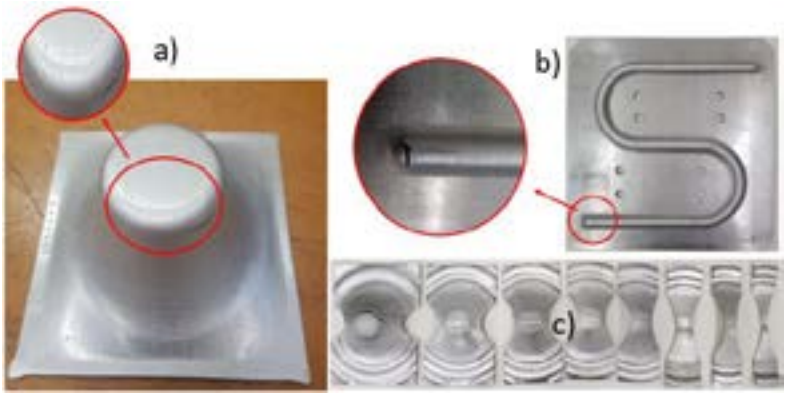
Fonte: Do autor

De acordo com Donato [20] e Schreiber [24], a curva de escoamento do material mostra consistência nos resultados, independentemente da orientação de laminação dos corpos de prova, apresentando valores próximos aos obtidos experimentalmente. No entanto, os dados exibidos no gráfico revelam diferenças marcantes entre as orientações avaliadas, ressaltando a importância de levar em conta as propriedades anisotrópicas do material em aplicações específicas.

3.4 ANÁLISE DAS DEFORMAÇÕES CLC E FLC

Com os valores das elipses obtidos para todos os corpos de prova, foi possível traçar a FLC para a estampagem incremental de pirâmides, cones e placas coletoras, bem como a CLC no ensaio de Nakajima conforme figura 7. Os resultados evidenciam que a geometria da peça e o incremento vertical (Δ_z) exercem influência significativa sobre o comportamento do material.

Figura 7: Deformações das geometrias: a) Peça estampada com geometria de cone; b) Placa absorvedora estampada; c) Corpos de prova ensaio Nakajima



Fonte: Do autor

Nos corpos conformados em forma de pirâmide, verificou-se que um menor incremento vertical (Δ_z = 0,2 mm) proporcionou maior resistência à fratura, indicando melhor distribuição de tensões e maior estabilidade do processo, em comparação ao incremento de 0,5 mm. De maneira similar, os corpos em formato de cone apresentaram comportamento compatível, embora com leve predominância de deformação biaxial (φ_2), sugerindo um estado de tensões mais uniforme.

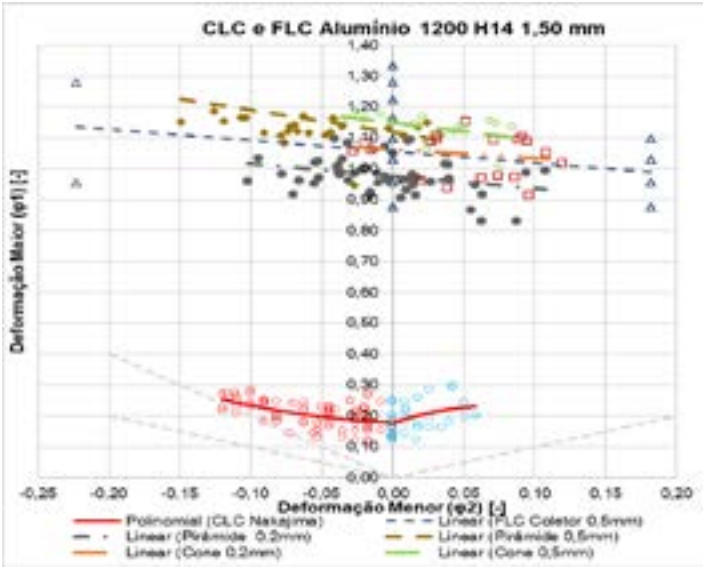
A análise das placas absorvedoras dos coletores solares conformadas por SPIF mostrou uma linha de fratura semelhante à observada nos demais formatos, com valores de φ_1 superiores a 1, evidenciando a elevada capacidade de deformação plástica antes da ruptura, favorecida pela uniformidade das tensões e ausência de pontos de concentração críticos.

No ensaio de Nakajima, corpos de prova com larguras variadas foram deformados até a fratura, possibilitando a construção da CLC do material. A análise das elipses próximas às trincas indicou valores médios de deformação principal (φ_1) em torno de 0,18 na região crítica, representando o limite típico da estampagem convencional. Esses resultados mostraram-se consistentes com os valores teóricos relatados por Schreiber [24] e Park [25], validando a metodologia adotada.

A análise comparativa entre os ensaios de conformação incremental (FLC) e os convencionais (CLC) evidencia a capacidade de suportar deformações superiores às estimadas para processos tradicionais, conforme relatado por Park [25] e Teixeira [26]. Em determinadas condições, foram obtidos valores de φ_1 acima de 1, demonstrando o elevado potencial de conformação do material quando processado por SPIF, conforme

representado na figura 8. Esses resultados confirmam a viabilidade do uso do alumínio em aplicações que exigem altos níveis de deformação plástica, como na produção de coletores solares fabricados diretamente por estampagem incremental.

Figura 08: Curva CLC e FLC do alumínio 1200 H14 1,5mm

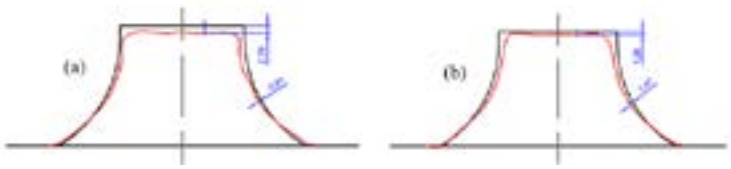


Fonte: Do autor

3.5 ANÁLISE DO PERFIL GEOMÉTRICO

A análise do perfil geométrico das peças produzidas por SPIF é fundamental para avaliar a influência do retorno elástico na precisão dimensional final [28]. A comparação entre o modelo CAD e as geometrias efetivamente obtidas por meio de medições tridimensionais possibilita identificar as variações decorrentes de deformações elásticas residuais. A figura 9 apresenta os resultados das medições tridimensionais realizadas nas peças conformadas com incrementos verticais ((Δ_z) de 0,2 mm e 0,5 mm.

Figura 08 – Comparação entre geometria projetada e medida em máquina tridimensional: a) Incremento de 0,2 mm; (b) Incremento de 0,5 mm.



Fonte: Do autor

As medições mostraram que o menor incremento (Δ_z = 0,2 mm) resultou em maior retorno elástico, consequência da menor deformação plástica acumulada, o que favorece a recuperação elástica após a liberação das tensões internas. Esse comportamento está em concordância com Allwood [28], que associa incrementos mais reduzidos a maiores desvios dimensionais. Em contraste, o incremento de (Δ_z = 0,5 mm) proporcionou conformações mais estáveis, apresentando menor diferença média em relação ao modelo teórico.

Foi também realizada a análise do ângulo de parede (Ψ), determinado geometricamente pela inclinação entre a trajetória da ferramenta e o plano horizontal da peça, cujos resultados estão apresentados na Tabela 4. A definição correta desse parâmetro é essencial para identificar os limites de conformação, além de possibilitar

ajustes no processo que minimizem o retorno elástico e aumentem a fidelidade geométrica [18]; [28].

Tabela 05: Angulo de parede da estampagem incremental cone e pirâmide

Tipo	Incremento [mm]	Profundidade [mm]	Ângulo [º]	s_0 [mm]	s_1 [mm]
Cone	0,20	46,54	88,17	1,50	0,04790
Cone	0,50	46,21	87,82	1,50	0,05706
Pirâmide	0,20	45,37	86,95	1,50	0,07981
Pirâmide	0,50	47,24	88,90	1,50	0,02880

Fonte: Do autor

Os valores obtidos mostraram boa correspondência com os resultados de Teixeira [26], permanecendo dentro das tolerâncias previstas e confirmando a confiabilidade do método e dos parâmetros aplicados.

4. CONCLUSÃO

A análise da composição química mostrou próxima à norma, com pequenas variações, e microestrutura homogênea com partículas intermetálicas distribuídas com grãos alongados decorrentes do processo de laminação. Após a estampagem incremental, a matriz manteve estabilidade, sem alterações significativas na estrutura do material.

Com base nos resultados no processo de estampagem incremental (SPIF) apresenta elevado potencial para a conformação de geometrias complexas, mostrando-se tecnicamente viável e adequado para aplicações como coletores solares térmicos. Os ensaios de tração confirmaram o comportamento típico de materiais dúcteis, destacando ainda a influência da orientação de laminação sobre as propriedades mecânicas, aspecto de grande relevância nos processos de conformação.

A comparação entre as CLC e as FLC evidenciou que o SPIF possibilita ao material superar os limites convencionais de deformação sem perda de integridade, resultado atribuído à distribuição homogênea das tensões e à menor concentração de esforços críticos. Na análise das geometrias em pirâmide e cone, observaram-se diferenças pouco significativas em φ_1, com leve predominância de deformação biaxial em φ_2 no cone, indicando que a forma da peça exerce apenas influência moderada no comportamento final.

A investigação do ângulo de parede (Ψ) e da espessura final demonstrou que tanto o incremento vertical Δ_z quanto a geometria da peça influenciam diretamente a profundidade conformada, o retorno elástico e a precisão dimensional. Enquanto incrementos menores favoreceram maior retorno elástico, os valores mais elevados de Δ_z resultaram em maior estabilidade geométrica.

REFERENCIAS

[1] ALLWOOD J. M., BRAUN D., MUSIC O. **The effect of partially cut-out blanks on geometric accuracy in incremental sheet forming,** Journal of Materials Processing Technology, vol. 210, pp. 1501-1510, 2010.

[2] MOTTA, L.E.C., DALEFFE, A., CONCER, R., MARCH D.M., CATELAN,J., FRITZEN,D., **Estampagem Incremental Multiplos Estágios em Chapas de Aço 1008,** Revista Vincci – Periódico Científico da UniSATC, v. 8, n. 2, p. 386-405, jul./dez., 2023.

[3] MARCH, D.G., PINHEIRO, W. C., FRITZEN, D., DALEFFE, A., CASTELAN, J., **Estudo do Processo de Estampagem Incremental em Chapas de Alumínio para uso em Aquecedores Solares**, Revista Vincci – Periódico Científico da UniSATC, v. 8, n. 2, p. 446-468, jul./dez., 2023.

[4] LU H., LIU H., WANG C., **Review on strategies for geometric accuracy improvement in incremental sheet forming**, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology , vol. 102, p. 3381–3417, 2019.
[5] JOVANI C., SCHAEFFER L., DALEFFE A., FRITZEN D., SALVARO V., SILVA F. P. d., **Manufacture of custom-made cranial implants from DICOM® images using 3D printing, CAD/CAM technology and incremental sheet forming**. *Revista Brasileira de Engenharia Biomédica,* 2014.
[6] DALEFFE A. Fabricação de Próteses Cranianas Personalizadas em Chapas de Titânio através da Estampagem Incremental. Trabalho de tese do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e Materiais PPG3M UFRGS. Porto Alegre 2014.

[7] ARRUDA R. P. D., BARONI A., SCHAEFFER L., Sheet metal forming: new technologies applied to the fabrication of solar energy collector panels, International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems*,* vol. 1 Nº2/3, 2008.

[8] ALUMÍNIO R., **Especial Mineração de Bauxita: como é feita a extração e qual a importância da atividade para o Brasil**, 30 setembro 2019. [Online]. Available: https://revistaaluminio.com.br/especial-mineracao-de-bauxita-como-e-feita-a-extracao-e-qual-a-importancia-da-atividade-para-o-brasil/. [Acesso em 05 01 2024].

[9] CBA, **Laminados de alumínio***,* São Paulo: Votorantim, 2002.

[10] LIMA J. P. P., **Estudo do comportamento mecânico da liga de alumínio ASTM/ABNT 1200 em função das condições de solicitação mecânica**, Trabalho de Conclusão de Curso*,* p. 50, 2016.

[11] PEREIRA R. C., SHIOTA R. T. S., MELLO S. F. M., ASSIS V. J., J. R. BARTOLI, **Eficiência térmica de coletores solares de baixo custo - csbc**, Novembro 2006.

[12] INPE I. N. d. P. E., **Atlas brasileiro de energia solar***,* 2.ed ed., São José dos Campos - SP, 2017.

[13] DUFFIE J. A., BECKMAN W. A., **Solar Engineering***,* 4th Edition. ed., I. H. N. J. John Wiley & Sons, Ed., 2013.

[14] TAVARES L. D. O., DIMBARRE V. V., BIGLIA F. M., CRUZ F. B. C., SANTOS P. H. D. D., ALVES T. A., **Análise Experimental do Desempenho Térmico de um Coletor Solar do Tipo Placa Plana***,* vol. 13º, Conbrepro - Comgresso brasileiro de Engenharia de Produção, 2023.
[15] COPPER DEVELOPMENT ASSOCIATION INC. **Solar Systems Use Copper to Harness Sun's Energy**. Building & Architecture News, 2010. Disponível em: https://www.copper.org/publications/newsletters/ba-news/2010/december/article4.html?utm. Acessado em: Julho de 2025.

[16] GREENER, T. S., **Energias renováveis no brasil e no mundo**, vol. 001, E-Book, 2018.
[17] PACHECO, F., **Energias Renováveis: breves conjuntura e planejamento,** Salvador p 4-11 outubro de 2006.
[18] FRITZEN, D., **Estudo dos Parâmetros de Conformabilidade para o Processo de Estampagem Incremental**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal de Rio Grande so Sul, Porto Alegre, 2016.
[19] TEIXEIRA, A. R., **Análise de Parâmetros de Estampagem Incremental para Alumíno Puro.** Porto Alegre: UFGS- Universidade Federal de Rio Grande de Sul, 2019.
[20] DONATO, G. H. B., MOÇO, R. F., **Caracterização de Resistência à Fadiga de Aço Sae 1008 e Alumínio 1200 H14 Utilizando Flexão Alternada com Corpos de Prova Normalizados e Propostos.** 71º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 16º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, parte integrante da ABM Week. Rio de janeiro, setembro de 2016.
[21] RODRIGUES, G. L., **Efeitos dos Tratamentos Térmicos em Ligas De Alumínio.** Monografia de Bacharel em Engenharia Mecânica. Universidade de Rio verde, Goiás 2015.
[21] CARDOSO, D. N., **Efeito do Ciclo Térmico no Encruamento de Ligas Metálicas com Características Estruturais Distintas.** Bacharel em Engenharia de Materiais. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2019.
[22] LIMA, J. P. P., **Estudo do Comportamento Mecânico da Liga de Alumínio Astm/Abnt 1200 em Função das Condições de Solicitação Mecânica,** Belo Horizonte MG, 2016.

[23] BARROS V. H. D. S., **Fabricação de Peças Complexas em Chapas Finas de Alumínio Comercialmente puro usando o Método de Estampagem Incremental***,* Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2019.
[24] SCHREIBER, R. G., **Método de Determinação do Limite de Deformação na Estampagem Incremental de Diferentes Materiais***,* Porto Alegre: UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2022.
[25] PARK J. J., KIM Y.-H., **Fundamental studies on the incremental sheet metal forming technique**, pp. 447-453, 2003
[26] TEIXEIRA, A. R., **Análise de Parâmetros de Estampagem Incremental para Alumíno Puro***,* Porto Alegre: UFGS- Universidade Federal de Rio Grande de Sul, 2019.
[27] J. P. P. LIMA, ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DA LIGA DE ALUMÍNIO ASTM/ABNT 1200 EM FUNÇÃO DAS CONDIÇÕES DE SOLICITAÇÃO MECÂNICA, Belo Horizonte MG, 2016

[28] ALLWOOD J., HOUGHTON N., JACKSON K., **The design of an incremental forming machine**, Proceedings of the 11th Conference on Sheet Metal, pp. 471-478, 2005
[29] ABNT.NBR-6152, **"Materiais metálicos** – Ensaio de tração à temperatura ambiente.," ABNT, Rio de Janeiro, 2002.
[30] SOUZA, S. R. de. Ensaios mecânicos de materiais metálicos. 4. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2019.

44º SENAFOR

28ª Conferência Internacional de Forjamento - Brasil
14ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas / 11º Congresso do BrDDRG
14ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis
3ª Conferência Internacional de Inovação em Materiais e Manufatura
Porto Alegre, RS, dias 1, 2 e 3 de outubro de 2025
www.senafor.com

TRINCAS NA DOBRA DO AÇO ABNT NBR 6655: INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE DEFORMAÇÃO E DO SENTIDO DE LAMINAÇÃO

Daniel Cunha Barrios [(1)]
Carlos Alexandre dos Santos [(1)]

(1) Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS) / Programa de Pós-graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais

RESUMO

Este trabalho investigou a influência da velocidade de dobra e da direção de laminação na ocorrência de trincas durante o processo de conformação de chapas metálicas. O material analisado consistiu do aço de baixo carbono conforme ABNT NBR 6655, inicialmente caracterizado por meio de ensaio de tração de acordo com a norma ASTM E8, com o objetivo de estabelecer o comportamento tensão–deformação de referência. Ensaios de tração adicionais foram realizados aplicando uma velocidade próxima à do processo de dobra para avaliar o efeito sobre o desempenho mecânico. Para avaliar a anisotropia induzida pela laminação os ensaios foram realizados com corpos de prova com fibras paralelas e perpendiculares à aplicação da carga. Os resultados evidenciaram um comportamento sem o patamar característico de escoamento no ensaio tensão-deformação para os corpos de prova com fibras paralelas, diferente do que ocorreu com os de fibra perpendicular. Quando submetidos à uma velocidade de 500 mm/min no ensaio de tração, houve um achatamento da curva em cerca de 50% em comparação ao ensaio à 10 mm/min conforme a norma ASTM E8. Palavras-chave: dobramento; direção de laminação; trincas; aço de baixo carbono; propriedades mecânicas.

1. INTRODUÇÃO

A conformação mecânica corresponde ao conjunto de processos de deformação plástica empregados para alterar a geometria de metais. Entre esses processos,

destaca-se o dobramento, amplamente aplicado pela simplicidade e versatilidade. No método de dobra ao ar, a chapa entra em contato apenas com o raio do punção e com os raios da matriz em "V". O ângulo de dobra é controlado pela profundidade de penetração do punção, no vão da matriz. É recomendado que a abertura da matriz seja de 6 a 8 vezes a espessura da chapa [9] e o raio interno de dobra resultante, pelo menos uma vez a espessura da chapa (recomendação de usina em função da conformabilidade do material), porém para materiais mais dúcteis, visando, por exemplo, melhor aproveitamento de setup, pode ocorrer a utilização de punções com raio inferior à recomendação.

A anisotropia, originada na laminação da chapa, pode potencializar a ocorrência de defeitos no processo de dobra, se houver heterogeneidade na orientação das fibras do material. Assim, a direção da laminação em relação ao eixo de dobra deve ser considerada [11]. Além disso, a velocidade de dobra, também pode afetar o comportamento do material, podendo intensificar a nucleação e propagação de trincas. Nesse contexto, o presente estudo busca avaliar de forma sistemática como a anisotropia e a velocidade de deformação influenciam na ocorrência de defeitos no processo de dobra do aço ABNT NBR 6655 [1].

Este trabalho investiga a influência da velocidade de dobra e da anisotropia induzida pela laminação na ocorrência de trincas durante o processo de dobramento. O material estudado é o aço ABNT NBR 6655 grau LN-20 [1], um aço baixo carbono utilizado em aplicações estruturais e de conformação mecânica. Suas especificações incluem limite de escoamento na faixa de 200 MPa, limite de resistência à tração em torno de 320 a 470 MPa e composição química típica de 0,150% $C_{máx}$, 1,000% $Mn_{máx}$ e baixos teores de P e S (máx 0,035%). O estudo busca compreender como a interação entre a velocidade de dobra e direção de laminação influencia a integridade do material.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa partiu da caracterização do aço ABNT NBR 6655 [1], fornecido em chapas de 6,3 mm de espessura. Foram determinadas, a composição química, a dureza, as propriedades mecânicas e a microestrutura, de modo a fornecer subsídios para a análise do comportamento durante a conformação. A composição foi obtida por espectrometria de emissão óptica, em conformidade com a norma ASTM E415, enquanto a dureza foi avaliada pelo método Rockwell B, segundo a ASTM E18-94 [5], utilizando esfera de 1/16" e carga de 100 kgf. Esse ensaio forneceu um primeiro indicativo da resistência do material, servindo de referência para os testes subsequentes.

Os ensaios de tração seguiram a norma ASTM E8 [3] e foram realizados em corpos de prova preparados em duas orientações em relação ao sentido de laminação (0° e 90°), totalizando dez amostras. A execução foi feita em máquina Shimadzu de 300 kN, sob velocidade de 10 mm/min até a ruptura. Com isso, foi possível obter curvas tensão-deformação e avaliar a anisotropia mecânica do material. A caracterização foi complementada por análise metalográfica em cortes longitudinal, transversal e superior da chapa, preparados conforme a ASTM E3-11(2017) [2], com lixamento, polimento e ataque químico em Nital 3%. As microestruturas reveladas em microscópio óptico, em ampliações de até 500x, permitiram compreender a morfologia e distribuição das fases.

Na etapa seguinte, investigou-se a influência da velocidade de conformação e da

direção de laminação no processo de dobra. Foram preparados vinte corpos de prova com linha de dobra paralela e perpendicular à laminação, conformados em dobradeira hidráulica LVD PPED 135/30, com matriz V40 e punções com raios de 3 mm e 6 mm. O processo adotado foi o dobramento ao ar, no qual o ângulo final resulta da profundidade de penetração do punção na matriz. Apesar de amplamente utilizado na indústria por sua flexibilidade, esse método apresenta o inconveniente do retorno elástico, que compromete a precisão dimensional e exige ajustes posteriores [11].Todos os corpos de prova foram dobrados até 90°, com comprimento útil de 150 mm e na velocidade máxima da máquina.

A avaliação da deformação foi conduzida por meio do conceito de bend allowance (BA), que corresponde ao acréscimo de comprimento decorrente da deformação plástica [10]. Para isso, mediu-se o comprimento inicial e o final após a abertura das abas, aplicando as correções relacionadas ao raio do punção. Essa análise possibilitou relacionar a extensão da deformação às condições de conformação.

Considerando que os defeitos de trinca ocorrem na região tracionada da dobra, foram realizados ensaios de tração em velocidades superiores, a fim de simular as condições do processo industrial. Dez corpos de prova adicionais foram preparados segundo a ASTM E8 [3] e ensaiados em 500 mm/min, limite máximo da máquina. Metade das amostras foi ensaiada com direção de laminação paralela à aplicação da carga e a outra metade, com direção perpendicular. Os resultados obtidos permitiram comparar a resposta mecânica em diferentes velocidades, fornecendo indícios da influência da velocidade nas propriedades do material.

A investigação foi concluída com a análise das regiões com defeitos de trinca por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Essa técnica permitiu identificar a morfologia das falhas, a origem e o modo de propagação das trincas. Foram examinados dois corpos de prova que apresentaram trincas após a dobra, um foi conformado com punção de 3 mm e outro de 6 mm. Os resultados obtidos complementaram a análise microestrutural e os ensaios mecânicos, permitindo estabelecer relações entre microestrutura, anisotropia, velocidade de conformação e parâmetros geométricos da ferramenta, fundamentais para compreender o fenômeno da formação de trincas durante a dobra do aço ABNT NBR 6655.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

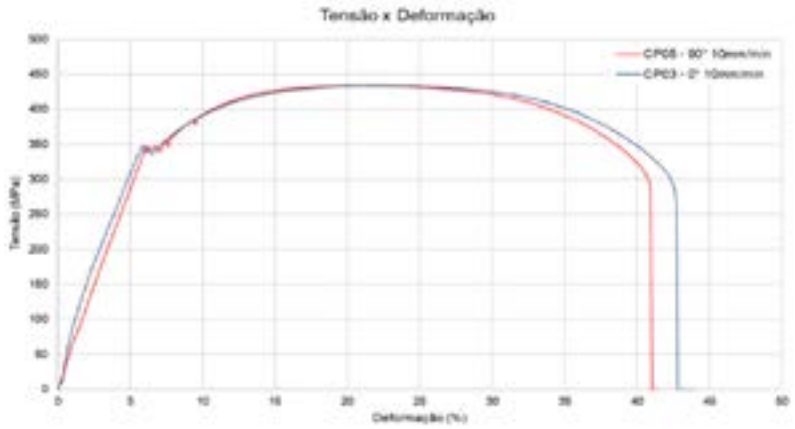
Os experimentos foram conduzidos para caracterizar o aço ABNT NBR 6655 [1] e avaliar o processo de conformação, considerando que a ocorrência de trincas depende da interação entre propriedades do material e parâmetros de dobra.

A análise de composição química usando espectrometria de emissão óptica, conforme a norma ASTM E415 [4], confirmou um aço grau LN200 (ABNT NBR 6655 LN-20), com teores dentro dos limites da norma. O baixo teor de carbono (<0,15%) justifica a predominância de ferrita com perlita nos contornos de grão, garantindo boa ductilidade. O manganês, dentro das especificações, contribui para o refino de grão e aumento da resistência mecânica.

A dureza média foi de 78 HRB, típica de aços brandos. Nos ensaios de tração (ASTM E8), dez corpos de prova foram testados em diferentes orientações de laminação. Os resultados mostraram tensão de escoamento em torno de 340 MPa, resistência máxima de 435 MPa e alongamento superior a 40%, valores compatíveis

com a NBR 6655 [1] (σ_e entre 200-360 MPa, $\sigma_{máx}$ entre 320-470 MPa e alongamento mínimo de 35%). Observou-se pequena variação entre amostras paralelas e perpendiculares à laminação Fig. 1.

Figura 1. Exemplos das curvas obtidas nos ensaios de tração.



A análise microestrutural (Figs. 2–5) evidenciou a predominância das fases ferrita e perlita, com grãos homogêneos característicos do processo de laminação a quente, que quando adequadamente conduzido, resulta em um material com grãos menores e de distribuição uniforme.

Figura 2. Faces analisadas da fração da chapa.

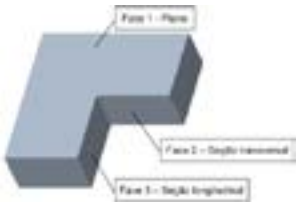


Figura 3. Micrografia da face 1 - plano da chapa.

Figura 4. Micrografia da face 2 - seção transversal da chapa.

Figura 5. Micrografia da face 3 - seção transversal da chapa.

Embora possam ocorrer variações microestruturais em função do gradiente térmico ao longo da chapa, as micrografias avaliadas indicam uma estrutura com boa uniformidade de grãos.

O ensaio de dobra foi realizado em vinte corpos de prova, considerando linhas de dobra paralelas e perpendiculares à direção de laminação, utilizando punções de raio 3 mm (R3) e 6 mm (R6) e matriz V40 (vão de 40mm) Tab.1. Observou-se que todos os corpos de prova que apresentaram o defeito de trinca, possuíam a linha de dobra paralela à laminação. A incidência foi maior ao utilizar punção de raio de 3 mm (R3), que impõe maior concentração de tensões, porém houve ocorrência, também com punção de raio de 6 mm (R6). Esses resultados indicam que a orientação da laminação exerce influência na susceptibilidade à formação de trincas durante a dobra.

Tabela 1. Ensaio de dobramento.

P M	S.L.	CP	L0	L	L1	ΔL	ΔL Médio	Bend Allowance	Trinca
R6 V40	Laminação paralela à dobra (0°)	1	95,0	119,4	76,2	19,4	19,4	9,7	
		2	95,3	117,8	74,6	20,7			
		3	95,9	119,4	76,2	19,7			
		4	95,9	119,6	76,4	19,5			
		5	95,8	119,7	76,5	19,3			x
R3 V40		6	95,4	117,9	80,7	14,7	14,8	7,4	x
		7	96,0	118,3	81,1	15,0			
		8	95,8	118,2	81,0	14,8			x
		9	95,2	117,5	80,3	14,9			
		10	95,8	118,4	81,2	14,6			x
R6 V40	Laminação perpendicular à dobra (90°)	1	95,8	119,2	76,0	19,8	19,8	9,9	
		2	95,8	118,6	75,4	20,5			
		3	95,8	119,1	75,9	19,9			
		4	95,6	119,1	75,9	19,7			
		5	95,0	119,4	76,2	19,5			
R3 V40		6	96,0	119,5	82,3	13,7	14,1	7,0	
		7	95,7	119,1	81,9	13,8			
		8	95,8	118,7	81,5	14,3			
		9	95,8	118,7	81,5	14,4			
		10	95,8	118,6	81,6	14,3			

LEGENDA

- P ; M: Punção ; Matriz-
- S.L.: Sentido de laminação
- CP: Corpo de prova
- L0: Desdobramento:
- L: Soma de todas as abas dobradas
- L1: Segmentos não deformados
- ΔL = L1 - L0
- BA: Bend Allowance (ΔL / N dobras)

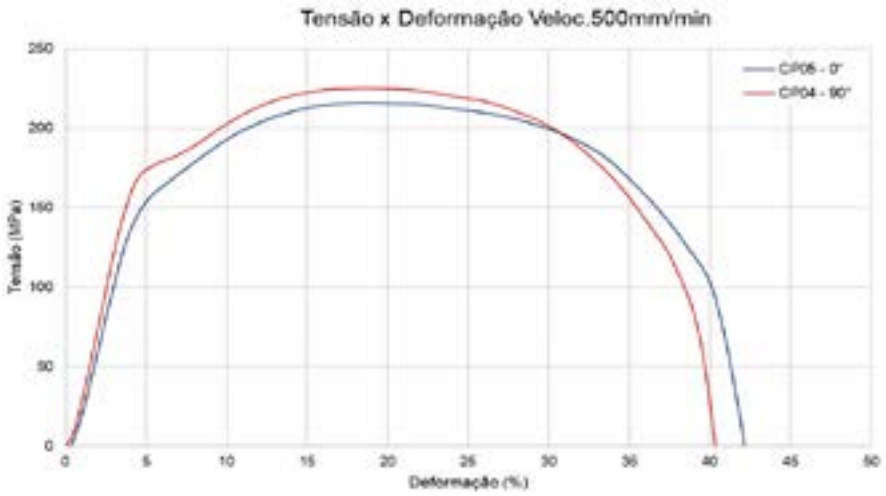
As Figs. 6 e 7 apresentam exemplos de corpos de prova sem e com trincas, respectivamente, ilustrando a relação entre direção de laminação e a resposta do material ao dobramento.

Figura 6. Corpos de Prova - Punção R3, Matriz V40 e Velocidade 10 mm/s – Dobra Perpendicular à Laminação.

Figura 7. Corpos de Prova - Punção R3, Matriz V40 e Velocidade 10 mm/s – Dobra Paralela à Laminação.

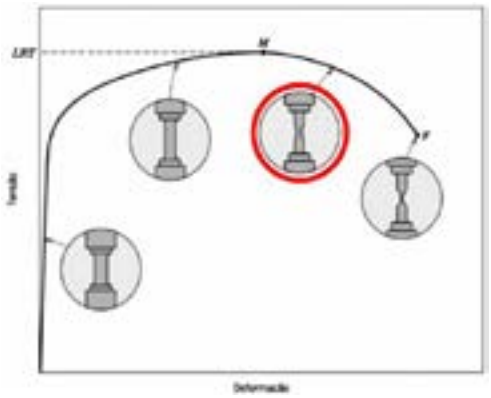
Para analisar o comportamento do material nas condições de processo, foi realizado ensaio de tração adotando velocidade de 500 mm/min, contrastando com a velocidade de caracterização (10 mm/min). As curvas obtidas (Fig. 8) revelaram algumas distinções: para amostras a com direção de laminação paralela à aplicação da carga não foi observado o patamar característico de escoamento, com passagem direta do regime elástico para o plástico. Já para amostras com laminação perpendicular à direção da carga o patamar foi observado, mas a ductilidade foi reduzida, com ruptura em deformação inferior.

Figura 8. Curva tensão x deformação velocidade 500 mm/min.



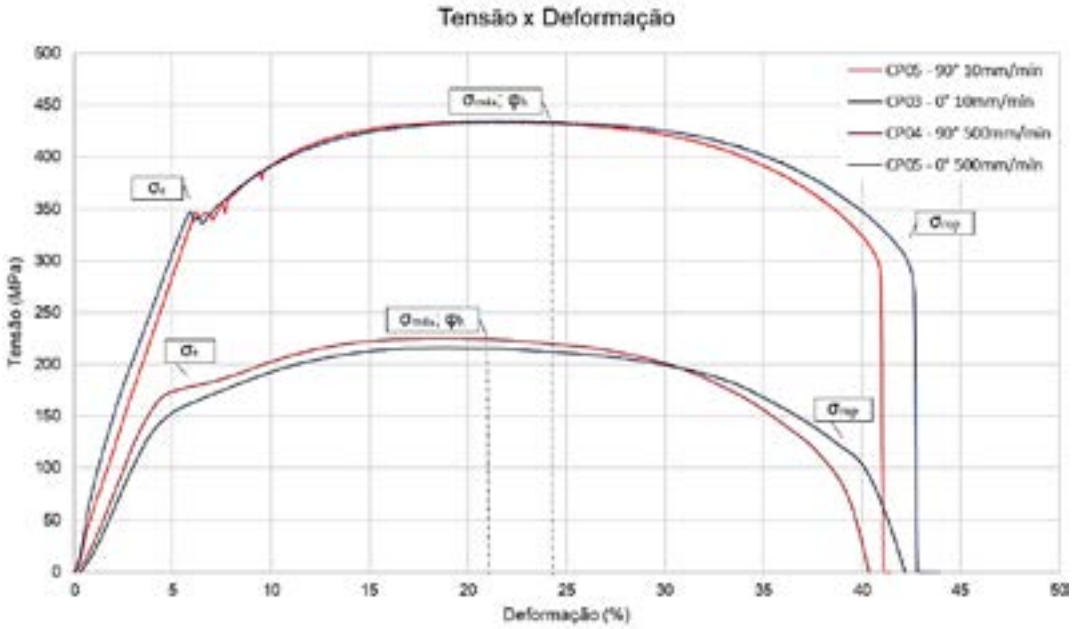
Para que ocorra a conformação mecânica o material deve ser deformado no regime plástico, mas sem exceder a deformação máxima homogênea, acima da qual o material passa a desenvolver defeitos, análogo ao que ocorre durante um ensaio de tração, na fase de estricção (Fig 9 - sinalizado).

Figura 9. Tensão-deformação relacionadas sob a aplicação de carga axial (Adaptado de Callister, 2002)



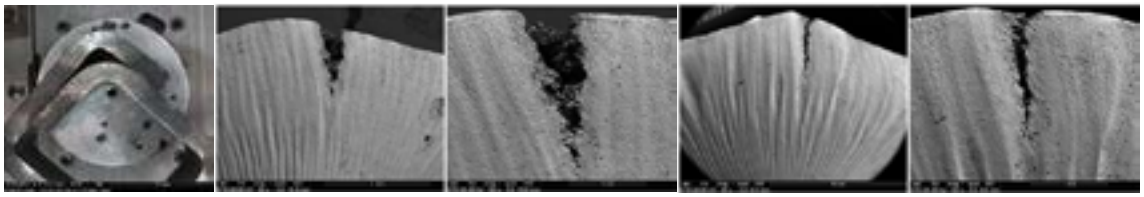
Comparando a resposta dos corpos de prova às diferentes velocidades (Fig. 10), aplicando de 500 mm/min no ensaio de tração, a máxima deformação homogênea (φh) é atingida em um alongamento inferior, além de haver um achatamento da curva em cerca de 50% em comparação ao ensaio à 10 mm/min, realizado conforme a norma ASTM E8 [3], evidenciando uma alteração significativa na resposta do material quando submetido a uma condição de deformação em alta velocidade.

Figura 10. Tensão-deformação relacionadas sob a aplicação de carga axial.



Por fim, a análise em MEV (Fig. 10) confirmou a natureza dúctil das fraturas, com deformação plástica ao redor das trincas. As amostras dobradas com punção R3 apresentaram trincas mais proeminentes. Esses resultados reforçam a relação entre raio do punção, anisotropia induzida pela laminação e taxa de deformação como fatores determinantes para a ocorrência de trincas no dobramento.

Figura 10. Formação de trinca na região de dobra – MEV.



4. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos permitem concluir que a velocidade de deformação exerce papel determinante na ocorrência de trincas durante a dobra de chapas de aço NBR 6655. Uma vez que a rápida aplicação da carga fragiliza o material por não permitir a adequada acomodação das discordâncias e ancoragem nos contornos de grão, a nucleação de trincas é favorecida, tal como evidenciado nos ensaios realizados a 500 mm/min. Além disso, verificou-se que a orientação da linha de dobra paralela à direção de laminação aumenta significativamente a suscetibilidade à formação de trincas, reforçando a importância do correto arranjo das peças já na etapa de nesting.

Outro fator relevante identificado foi o raio do punção. Como esperado, o uso de punções com raio inferior à espessura da chapa intensificou a incidência de falhas, em concordância com as recomendações de usinas siderúrgicas e fabricantes de ferramentas de dobra, que prescrevem a adoção de punções com raio de, no mínimo, uma vez a espessura da chapa. Contudo, no contexto industrial, a utilização de punções de raio menor pode ocorrer em função de restrições, como falta de comprimento de ferramental, otimização de setup, dentre outros.

Assim, a combinação de alta velocidade de deformação, orientação de dobra paralela à laminação e punções com raio inferior à espessura caracteriza um conjunto de fatores críticos que contribuem para a nucleação e propagação de trincas, devendo ser cuidadosamente avaliados.

REFERÊNCIAS

[1] ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6655:2011: Bobinas e chapas laminadas a quente de aço acalmado com características melhoradas de propriedades mecânicas, conformabilidade e soldabilidade — Especificação, 2011.

[2] ASTM. American Society for Testing Materials. ASTM E3–11: Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens. In: Annual Book of ASTM Standards, 2017.

[3] ASTM. American Society for Testing Materials. ASTM E8/E8M–22: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. In: Annual Book of ASTM Standards, 2022.

[4] ASTM. American Society for Testing Materials. ASTM E415–21: Standard Test Method for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry. In: Annual Book of ASTM Standards, 2021.

[5] ASTM. American Society for Testing Materials. ASTM E18–22: Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials. In: Annual Book of ASTM Standards, 2022.

[6] CALLISTER, W. D., Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução, 5 ed., Rio de Janeiro: LTC Editora, 2002.

[7] CHIAVERINI, Vicente. Aços e Ferros Fundidos. 7. ed. São Paulo: ABM, 2005.

[8] KACAR, Ilyas. Prediction of Strain Limits via the Marciniak-Kuczynski Model and a Novel Semi-Empirical Forming Limit Diagram Model for Dual-Phase DP600 Advanced High Strength Steel. Strojniski Vestnik/Journal of Mechanical Engineering. V. 66, n 10, 2020.

[9] LVD, Tooling Essentials. LVD Group, Belgium. Disponível em: https://www.lvdgroup.com/sites/default/files/uploads/downloads/tooling_essentials_en_nl_fr_de_1.cleaned.pdf. Acesso em 06 jul. 2023.

[10] NARGUNDKAR, Ninad., Bend allowance and springback in air bending: How to predict it and compensate for it. The Fabricator, usa/set. 2005. Disponível em: https://www.thefabricator.com/thefabricator/article/bending/bend-allowance-and-springback-in-air-bending. Acesso em 15 jun. 2023.

[11] RODRIGUES, Jorge e MARTINS, Paulo. Tecnologia Mecânica: Tecnologia da Deformação Plástica. 2 ed. Lisboa: Escolar Editora, 2010

[12] SANTOS, Rogério Gonçalves dos. Estudo da dureza de encruamento por tração do aço SAE1045 temperado e revenido. Repositório Institucional do Conhecimento do Centro Paula Souza – RIC - CPS, Sorocaba, 2020. Disponível em: https://ric.cps.sp.gov.br/handle/123456789/4447. Acesso em 05 jul. 2023.

[13] SCHAEFFER, Lirio. Conformação de Chapas Metálicas. 2 ed. Porto Alegre: Imprensa Livre Editora Ltda, 2004.

[14] VERLEYSEN, Patricia et al. Effect of strain rate on the forming behaviour of sheet metals. Journal of Materials Processing Technology, v. 211, n. 8, p. 1457-1464, 2011.

[15] VORKOV, Vitalii. Bending Parameters in Heat Assisted Air Bending of High Strength Steels. Procedia Manufacturing, v. 47, p. 1314-1318, 2020

INFLUENCE OF STRAIN RATE AND ROLLING ANISOTROPY ON CRACK FORMATION IN THE BENDING OF LOW-CARBON STEEL

ABSTRACT

This study investigated the influence of bending speed and rolling direction on crack formation during sheet metal forming. The material analyzed was a low-carbon structural steel according to ABNT NBR 6655, initially characterized through tensile testing following ASTM E8 to obtain the stress–strain curve and establish reference mechanical behavior. Considering that crack initiation is related to tensile stress, additional tensile tests were conducted at strain rates similar to those in the bending process, enabling assessment of strain rate effects on mechanical performance. Specimens were extracted with fibers oriented parallel and perpendicular to the loading axis to evaluate rolling-induced anisotropy. Results showed significant variations in mechanical properties depending on loading rate and confirmed that rolling direction is a key factor in susceptibility to crack formation during bending.

Keywords: bending; rolling direction; cracks; low-carbon steel; mechanical properties

44° SENAFOR

28ª Conferência Internacional de Forjamento - Brasil
14ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas / 11º Congresso do BrDDRG
14ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis
3ª Conferência Internacional de Inovação em Materiais e Manufatura

Porto Alegre/RS 1, 2 e 3 de outubro de 2025

Influência da marcação a laser na estampabilidade de chapas de alumínio em estampagem incremental

Influence of laser marking on the drawability of aluminum sheets during incremental sheet forming

Paulo Vitor Fedri Carvalho[1], Alysson Henrique Rudek[2], Bianca Grahl Reyes[2], Milton Pereira[1], Márcio Celso Fredel[1], Rafael Gustavo Schreiber[2], Rafael Santiago Floriani Pereira[1]

[1] Mechanical Engineering Department, Federal University of Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, Brazil

[2] Federal Institute of Santa Catarina (IFSC), Lages, Brazil,

RESUMO

A caracterização das deformações em processos de conformação mecânica de chapas metálicas é tradicionalmente realizada de forma manual, utilizando escalas, lupas e estereoscópios, a partir de grades marcadas com geometria e espaçamento conhecidos. Comumente, essas grades são obtidas por processos eletroquímicos, os quais apresentam limitações quanto à aplicação manual, à baixa resolução e à dificuldade de controle do processo. Este trabalho teve como objetivo avaliar os efeitos da marcação a laser em chapas destinadas à conformação, comparando-a à técnica eletroquímica convencional. Para tanto, foram realizadas estampagens incrementais em chapas de alumínio AA1200-H14, com espessura de 0,8 mm, a fim de potencializar as deformações e, consequentemente, evidenciar a influência das diferentes técnicas de marcação na estampabilidade do material. Como referência, adotaram-se amostras marcadas por via eletroquímica. Para a marcação a laser, empregou-se um sistema ND:YAG nano pulsado, variando-se a potência aplicada (em porcentagem da potência máxima nominal) e a velocidade de varredura em três condições: 100% x 1000 mm/s, 100% x 200 mm/s e 20% x 200 mm/s. Adicionalmente, utilizou-se um laser de CO_2 com tinta spray para marcação. Os resultados indicaram que apenas a condição mais severa de marcação a laser (100% x 200 mm/s) impactou significativamente a conformação do material, resultando em uma redução de aproximadamente 30% na deformação máxima alcançada. A análise da morfologia de fratura revelou que, nessa condição, as trincas propagaram-se preferencialmente ao longo dos sulcos gerados pelo laser, enquanto nas demais condições e técnicas avaliadas, a direção das trincas manteve-se perpendicular ao eixo de estiramento da chapa. Conclui-se que a técnica de marcação a laser ND:YAG, quando adequadamente parametrizada, apresenta vantagens em relação ao método eletroquímico, oferecendo maior reprodutibilidade, melhor resolução e menor tempo de processamento, sem comprometer a estampabilidade do material.

Palavras-chave: Estampagem Incremental, Marcação a Laser, Estampabilidade, Deformação.

ABSTRACT

The characterization of strain in sheet metal forming processes is traditionally performed manually using scales, magnifiers, and stereoscopes, based on grids with known geometry and spacing. These grids are commonly produced by electrochemical methods, which are limited by manual application, low resolution, and poor process control. This study aimed to evaluate the effects of laser marking on sheets intended for forming, in comparison with the conventional electrochemical technique. Incremental sheet forming tests were carried out on 0.8 mm thick AA1200-H14 aluminum plates to maximize deformation and thus highlight the influence of the different marking techniques on the material's drawability. Electrochemically marked samples were used as a reference. For laser marking, a nanosecond-pulsed ND:YAG laser system was employed under three different conditions combining applied power (as a percentage of maximum nominal power) and scan speed: 100% x 1000 mm/s, 100% x 200 mm/s, and 20% x 200 mm/s. Additionally, a CO_2 laser with spray ink was used for marking. The results showed that only the most severe laser marking condition (100% x 200 mm/s) significantly affected the material’s formability, leading to a reduction of approximately 30% in the maximum achievable strain. Fractography analysis revealed that, under this severe condition, cracks tended to propagate along the laser-induced grooves, whereas for all other conditions and techniques, cracks propagated perpendicular to the sheet stretching direction. It is concluded that the ND:YAG laser marking technique, when properly parameterized, offers advantages over the electrochemical method, providing higher reproducibility, better resolution, and shorter processing time without compromising the material's drawability.

Keywords: Incremental Sheet Forming (ISF), Laser Marking, Drawability, Strain

I. INTRODUCTION

The grid method, widely employed for strain analysis in sheet metal forming, consists of applying a regular mesh on the specimen surface, allowing detailed mapping of displacement and strain fields during tests wan[1–3]. This technique is valued for its experimental simplicity, high spatial resolution, and capability of providing full-field information, being particularly useful for visualizing and quantifying strain distribution in processes such as stamping. However, it presents limitations, especially when scaled down to the microscale, where the deposition of ultra-fine grids requires sophisticated equipment. Additionally, surface preparation can be laborious, as uniform and precise application of the grid is essential for measurement quality, and imperfections may compromise the analysis [4,5].

Incremental Sheet Forming (ISF) is a forming process in which a point tool, typically CNC-controlled, gradually deforms the sheet layer by layer until reaching the desired geometry, without requiring specific dies. Its main advantages include high flexibility for producing customized or low-volume parts, the capability to manufacture complex geometries, and enhanced formability compared to conventional processes, allowing steeper wall angles and fewer design constraints [6–10]. Moreover, ISF reduces tooling costs and enables quick design adjustments, making it especially attractive for prototyping and customization. However, drawbacks such as low geometric accuracy, slow production speed, and dimensional control challenges limit its large-scale industrial application [11,12]. Recent trends include hybrid processes combining ISF with other techniques or applying energy assistance (e.g., heating, ultrasonic or electric fields) to improve accuracy, increase productivity, and expand industrial applicability. Additionally, advances in computational modeling have contributed to failure prediction and process optimization [13,14].

Laser marking of metals, in turn, is widely used for identification, traceability, and customization of products. It is considered an efficient, high-resolution, non-destructive, and environmentally sustainable technique, as it does not require chemical inputs or generate waste [15–17]. Depending on laser parameters and material type, the process may involve mechanisms such as surface melting, controlled oxidation, or the formation of micro/nanostructures [16–19]. Industrial applications include the production of monochromatic or colored marks with high repeatability and stability, as well as good

mechanical and chemical resistance under moderate environmental conditions [17,19–22]. Studies indicate that such marks exhibit increased surface hardness and wear resistance, although they may degrade under extreme temperature or humidity [16,17,20]. Regarding substrate mechanical properties, conventional laser marking based on thermal effects generally does not significantly affect bulk mechanical strength, as modifications occur only in a thin surface layer. On the other hand, advanced methods such as Laser Shock Marking (LSM) can even enhance surface performance by introducing compressive residual stresses, improving fatigue and wear resistance [16]. However, some reports indicate that in stainless steels, laser marking may reduce corrosion resistance in aggressive environments due to oxide formation or surface microcracks.

In this context, the present work aims to investigate optimized parameters for laser marking of grids intended for strain measurement in samples subjected to incremental sheet forming.

II. MATERIALS AND METHODS

All tests were carried out on AA1200-H4 aluminum sheets with a thickness of 0.8 mm, onto which grids composed of circles with 1 mm diameter were inscribed.

Marking efficiency was evaluated using three distinct methods: electrochemical (reference), CO_2 laser, and Nd:YAG laser.

In the electrochemical route, the electrolyte consisted of a solution containing NaCl, lactic acid, nitric acid, and deionized water. A potential difference of 20 eV was applied between the specimen and a graphite electrode. Marking was performed in three successive passes at an approximate speed of 25 mm/s. Figure 1 shows the apparatus used for electrochemical marking.

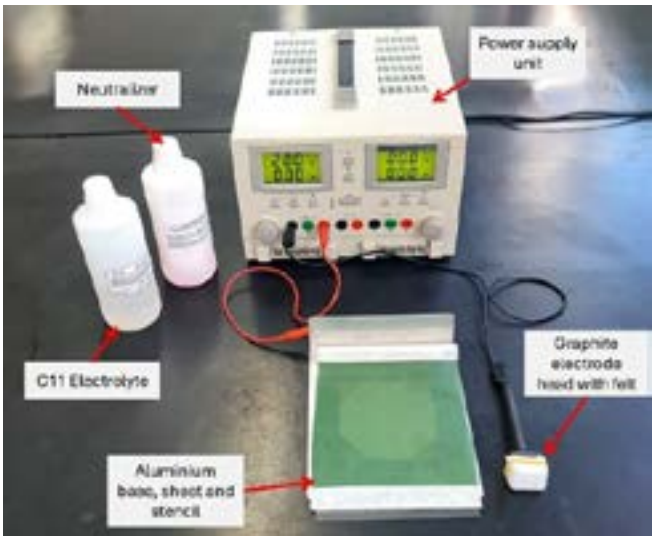


Figure 1 - Electrochemical etching apparatus

For laser marking, two approaches were investigated:

1 - CO_2 laser: equipment with a wavelength of 10,600 nm, pulse duration of 100 ns, and nominal power of 30 W. The beam diameter ranged between 2 and 3 mm. The adopted parameters were: 100% of nominal power, scanning speed of 200 mm/s, and pulse frequency of 25 kHz. A commercial spray specific for metal marking was applied prior to engraving.

2 - Nd:YAG laser: equipment with a wavelength of 1064 nm, pulse duration of 120 ns, and nominal power of 20 W. The beam diameter, measured for this material, was approximately 44 µm. Three processing conditions were tested, varying applied power and scanning speed: 100% × 1000 mm/s, 100% × 200 mm/s, and 20% × 200 mm/s, while keeping the pulse frequency constant at 25 kHz.

Surface damage resulting from each marking technique was assessed using an Alicona infinite focus microscope.

Incremental sheet forming (ISF) tests were performed using an ABB robotic arm, model IRB140. The sheets were fixed to a device mounted on the robot base, which guided the forming tool with a hemispherical tip (radius 5 mm), as shown in Figure 2.

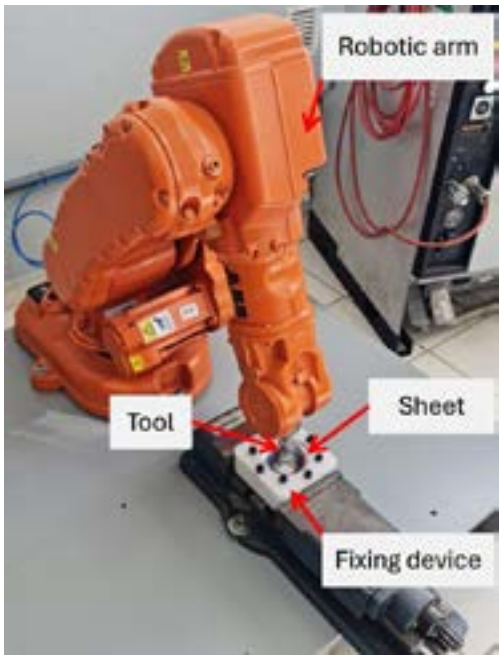


Figure 2 - Robotic arm and device used during ISF.

The stamped geometry corresponds to a hyperboloid, with an initial diameter of 70 mm and lateral radius of 60 mm. This geometry enables each vertical increment of the tool (step down) to generate a new wall angle, gradually increasing from the initial angle (θ_0) to the final angle (θ). The process continues until the sheet reaches the minimum thickness (s) and fracture occurs at a maximum depth (h). Three ISF tests were carried out for each grid marking condition.

The tool trajectory was executed with a feed rate of 20 mm/s and a constant vertical increment of 0.5 mm. The tool, made of SAE 1045 steel, was lubricated by applying a thin layer of VG100 oil to the contact region with the sheet.

The true principal strain ε_1 was determined by Equation (1), while thickness strain (ε_3) was obtained under the assumption of volume constancy:

$$\varepsilon = \ln\left(\frac{d_1}{d_0}\right) \tag{1}$$

where d0 is the initial circle diameter before forming (1 mm) and d1 is the ellipse diameter after deformation.

After fracture, the ellipse closest to the crack region was identified and used as reference for calculating true strains in each direction. The ellipse dimensions were measured using a flexible scale.

III. RESULTS AND DISCUSSION

The first outcome in a laser marking study is the construction of a processing matrix comprising different parameter combinations. From this matrix, the most promising conditions are selected for detailed investigation. Due to its extent, preliminary results are not presented here; however, it is important to note that the parameters described in the Materials and Methods section were defined based on this matrix.

To properly interpret the results, surface damage on aluminum caused by the different marking techniques was evaluated using infinite focus microscopy.

A general surface analysis revealed that electrochemical marking does not generate repetitive patterns (Figure 3A). This behavior can be attributed to the manual nature of the process, where pressure control and electrode displacement speed are difficult to regulate. Similarly, CO_2 laser marking also produced non-homogeneous patterns (Figure 3B), due to the manual spray application step, which compromised repeatability.

The most consistent and repeatable conditions were obtained with Nd:YAG laser marking. Another relevant aspect evident in Figure 3 is the resolution of the markings: conditions C and D produced finer, well-defined lines, with potential to reduce errors in subsequent strain measurements.

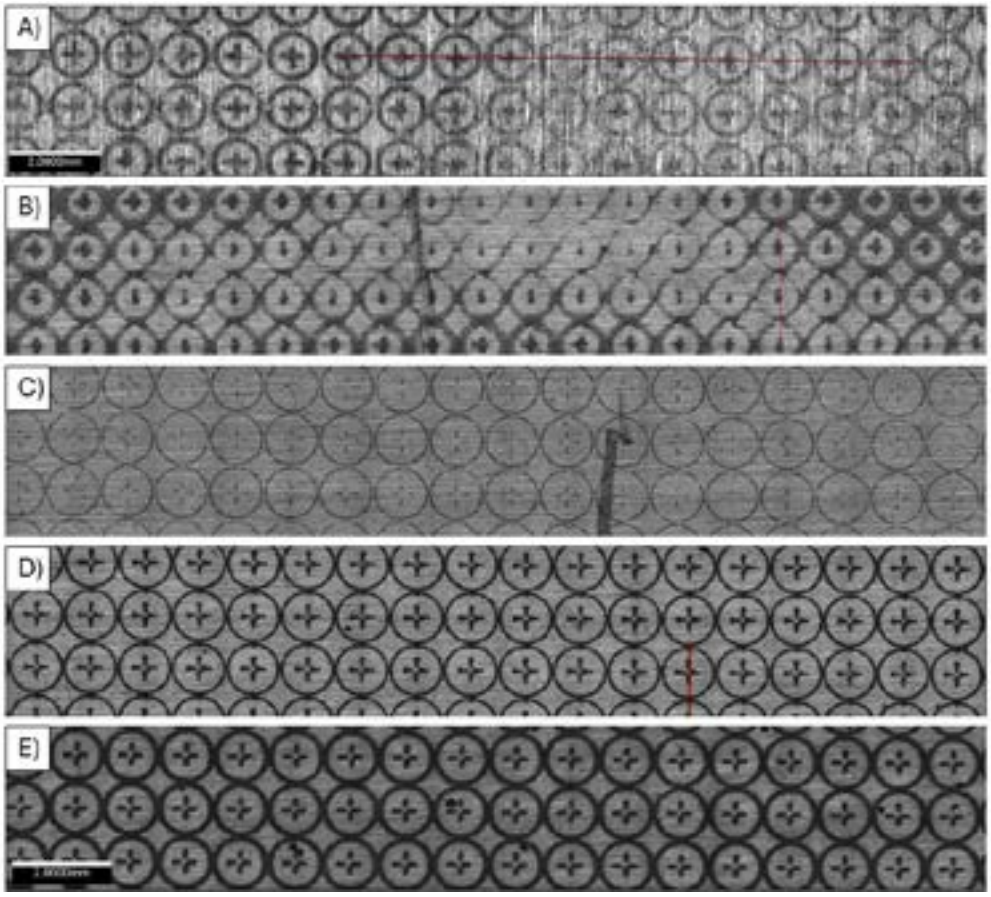


Figure 3 - Overview of the samples. A) Electrochemical etching, B) CO2 laser, C) Nd:YAG V1000P100, D) Nd:YAG V200P20, E) Nd:YAG V200P100.

In the incremental sheet forming tests, only one condition resulted in a visually distinct fracture pattern, as illustrated in Figure 4. Figure 4A shows the fracture of a specimen marked with Nd:YAG laser at 200 mm/s scanning speed and 100% nominal power, where the crack propagated along the marked circles. In contrast, Figure 4B shows the fracture behavior observed under all other marking conditions, where cracks propagated predominantly in a radial manner.

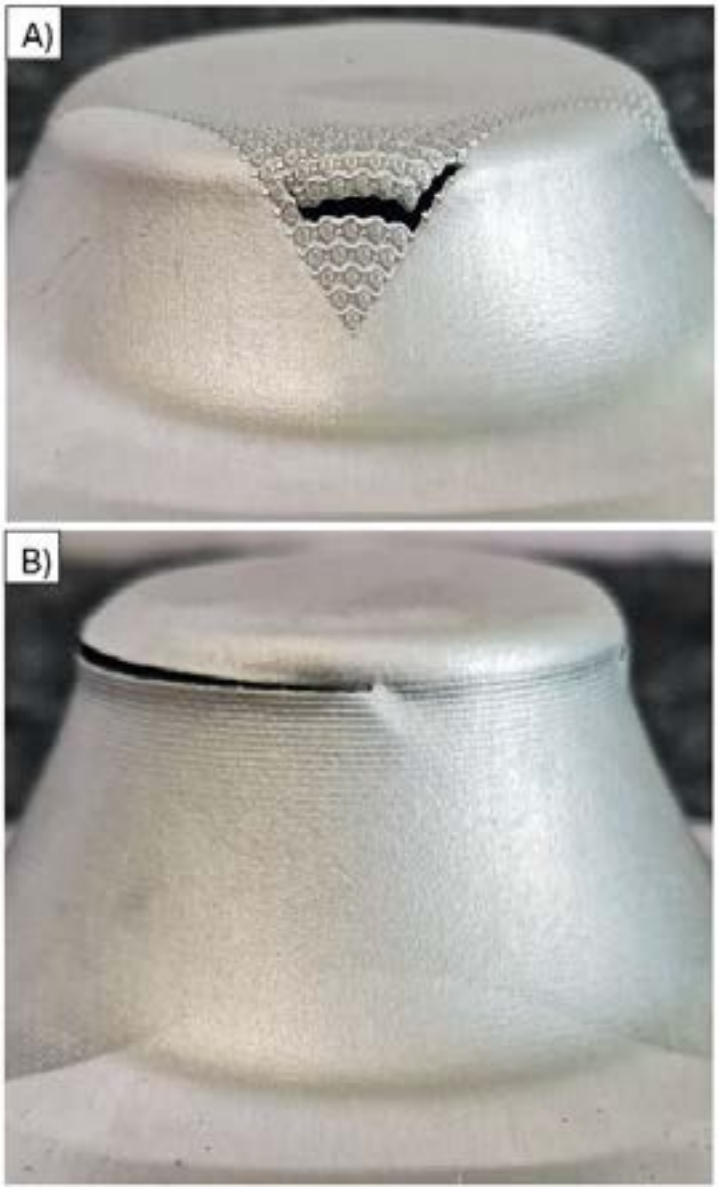


Figure 4 – Fracture appearance of a grid influenced crack (A) and a usual crack (B).

In addition to fracture appearance, the ellipses measured after forming were analyzed to verify whether different marking conditions affected the maximum sheet strain. As shown in Table 1, only the most severe condition — corresponding to 30 W nominal power and 200 mm/s scanning speed — produced a significant difference in maximum strain.

Table 1 - Maximum true strain after incremental sheet forming.

Condition	ε_1 (mean)	Std. Dev.
P100 v200	0.916	0.038105
P100 v1000	1.309	0
P10 v200	1.294	0.025981
Laser co2	1.279	0.025981
Electrochemical	1.294	0.025981

IV. CONCLUSIONS

Different marking techniques were evaluated with the objective of optimizing strain measurement using the visioplasticity technique. It was observed that methods involving manual steps — such as electrochemical marking and CO_2 laser with spray — resulted in irregular and lower-resolution grids. In contrast, Nd:YAG laser marking proved more promising, providing homogeneous, well-defined, and more reproducible grids.

Among the Nd:YAG laser parameters tested, only the condition with the highest thermal input (200 mm/s scanning speed and 30 W nominal power) compromised performance in the forming tests, reducing the maximum strain at fracture.

Considering its relatively low cost and high reproducibility, the bench-top Nd:YAG laser presents itself as an efficient alternative for grid marking on metal sheets.

Future work should focus on optimizing marking parameters to achieve higher contrast, increased productivity, and reduced thermal input, thereby expanding the applicability of the technique.

1. Pankaj, W.; Radhakrishnan, T.; Suresh, K.; Radhika, S. CGA: An Image Processing Based Software for Surface Strain Analysis in Sheet Metal Forming. *J Strain Anal Eng Des* **2021**, *56*, 519–530, doi:10.1177/0309324721996575.

2. Shi, B.-Q.; Liang, J. Circular Grid Pattern Based Surface Strain Measurement System for Sheet Metal Forming. *Opt Lasers Eng* **2012**, *50*, 1186–1195, doi:10.1016/j.optlaseng.2012.04.007.

3. Wankhede, P.; Kodey, S.; Kurra, S.; Radhika, S. A Low Cost Surface Strain Measurement System Using Image Processing for Sheet Metal Forming

Applications. *Measurement* **2022**, *187*, 110273, doi:10.1016/j.measurement.2021.110273.

4. Wankhede, P.; Mahesh, K.; Kurra, S.; Priyadarshini, A.; Kotkunde, N. A Comparative Study on the Effect of Grid Printing Methods and Camera Hardware in Automatic Strain Measurement through CGA. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering* **2024**, *238*, 560–569, doi:10.1177/09544089221107527.
5. Mäntyjärvi, K.; Tulonen, J.; Saarnivuo, T.; Porter, J.; Karjalainen, J.A. Grid Patterns by Laser for Forming Strain Analysis. *International Journal of Material Forming* **2008**, *1*, 249–252, doi:10.1007/s12289-008-0355-y.
6. Echrif, S.B.M.; Hrairi, M. Research and Progress in Incremental Sheet Forming Processes. *Materials and Manufacturing Processes* **2011**, *26*, 1404–1414, doi:10.1080/10426914.2010.544817.
7. Ajay; Mittal, R.K. *Incremental Sheet Forming Technologies*; CRC Press: First edition. | Boca Raton, FL : CRC Press, 2021., 2020; ISBN 9780429298905.
8. Patel, D.; Gandhi, A. A Review Article on Process Parameters Affecting Incremental Sheet Forming (ISF). *Mater Today Proc* **2022**, *63*, 368–375, doi:10.1016/j.matpr.2022.03.208.
9. Trzepieciński, T.; Najm, S.M.; Oleksik, V.; Vasilca, D.; Paniti, I.; Szpunar, M. Recent Developments and Future Challenges in Incremental Sheet Forming of Aluminium and Aluminium Alloy Sheets. *Metals (Basel)* **2022**, *12*, 124, doi:10.3390/met12010124.
10. Gatea, S.; Ou, H.; McCartney, G. Review on the Influence of Process Parameters in Incremental Sheet Forming. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **2016**, *87*, 479–499, doi:10.1007/s00170-016-8426-6.
11. Ambrogio, G.; Filice, L.; Manco, G.L.; Chinesta, F.; Chastel, Y.; El Mansori, M. Improving Process Performance in Incremental Sheet Forming (ISF).; 2011; pp. 613–618.

12. Chang, Z.; Yang, M.; Chen, J. Geometric Deviation during Incremental Sheet Forming Process: Analytical Modeling and Experiment. *Int J Mach Tools Manuf* **2024**, *198*, 104160, doi:10.1016/j.ijmachtools.2024.104160.

13. Trzepieciński, T.; Oleksik, V.; Pepelnjak, T.; Najm, S.M.; Paniti, I.; Maji, K. Emerging Trends in Single Point Incremental Sheet Forming of Lightweight Metals. *Metals (Basel)* **2021**, *11*, 1188, doi:10.3390/met11081188.

14. Long, H.; Peng, W.X.; Chang, Z.D.; Zhu, H.; Jiang, Y.J.; Li, Z.H. New Rosette Tools for Developing Rotational Vibration-Assisted Incremental Sheet Forming. *J Mater Process Technol* **2024**, *326*, 118311, doi:10.1016/j.jmatprotec.2024.118311.

15. Morawiński, Ł.; Świłło, S.; Kocanda, A. Application of Laser Barcode Technology to Sheet Metal Parts Identification. *Scientific Papers of Silesian University of Technology. Organization and Management Series* **2022**, *2022*, 501–516, doi:10.29119/1641-3466.2022.162.27.

16. Ganzulenko, O.Y.; Petkova, A.P. Simulation and Approbation of the Marking Laser Process on Metal Materials. *J Phys Conf Ser* **2021**, *1753*, 012016, doi:10.1088/1742-6596/1753/1/012016.

17. Liu, H.; Lin, W.; Hong, M. Surface Coloring by Laser Irradiation of Solid Substrates. *APL Photonics* **2019**, *4*, doi:10.1063/1.5089778.

18. Wlodarczyk, K.L.; Ardron, M.; Waddie, A.J.; Taghizadeh, M.R.; Weston, N.J.; Hand, D.P. Tamper-Proof Markings for the Identification and Traceability of High-Value Metal Goods. *Opt Express* **2017**, *25*, 15216, doi:10.1364/OE.25.015216.

19. Dusser, B.; Sagan, Z.; Soder, H.; Faure, N.; Colombier, J.P.; Jourlin, M.; Audouard, E. Controlled Nanostructrures Formation by Ultra Fast Laser Pulses for Color Marking. *Opt Express* **2010**, *18*, 2913, doi:10.1364/OE.18.002913.

20. Dolchinkov, N.T.; Petrov, T.; Petrov, G.; Tolev, C.; Dimitrov, E. FEATURES OF COLOR LASER MARKING ON METALS. *ENVIRONMENT. TECHNOLOGIES. RESOURCES. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference* **2023**, *3*, 297–305, doi:10.17770/etr2023vol3.7222.

21. Hristov, V.; Lazov, L.; Yankov, E.; Karadzhov, T.; Minev, R.; Angelov, N. Surface Analysis Study of Laser Marking Process of Stainless Steel X5CrNi18-10. In Proceedings of the 2021 Sixth Junior Conference on Lighting (Lighting); IEEE, September 23 2021; pp. 1–5.

22. Cucerca, S.; Didyk, P.; Seidel, H.-P.; Babaei, V. Computational Image Marking on Metals via Laser Induced Heating. *ACM Trans Graph* **2020**, *39*, doi:10.1145/3386569.3392423.

44º SENAFOR

28ª Conferência Internacional de Forjamento - Brasil
14ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas / 11º Congresso do BrDDRG
14ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis
3ª Conferência Internacional de Inovação em Materiais e Manufatura
Porto Alegre, RS, dias 1, 2 e 3 de outubro de 2025

ROTA PARA FABRICAÇÃO DE PEÇAS ESTRUTURAIS POR ESTAMPAGEM A FRIO SEGUIDO DE TÊMPERA LOCALIZADA

Matheus Passos Sarmento Santos [1]
Bruna Callegari [2]
Luis Fernando Folle [3]
Jessica Santana [4]
Gustavo Curti [5]
Tiago Nunes Lima [6]

www.senafor.com

RESUMO

A indústria automotiva tem buscado desenvolver novas rotas de fabricação de componentes estruturais, com foco em economia de recursos enquanto mantendo a segurança dos passageiros. Atualmente, componentes de carroceria que necessitam de uma combinação entre elevada resistência mecânica e otimização de massa são produzidos por estampagem a quente, processo no qual o *blank* é conformado em altas temperaturas e resfriado rapidamente durante a conformação. Neste trabalho, propõe-se uma rota alternativa para peças com geometria simples, baseada na estampagem a frio, seguida por uma etapa de têmpera localizada via aquecimento por efeito Joule. Essa abordagem permite a obtenção de componentes com variações microestruturais, ajustadas de acordo com a necessidade funcional da peça. Testes físicos acompanhados de caracterização microestrutural foram realizados em amostras com perfil em "U", utilizando o simulador termomecânico Gleeble. Em seguida, foi realizado um ensaio de dobramento em amostras tratadas de forma localizada e em amostras estampadas a quente, para fins de comparação. Adicionalmente, desenvolveram-se simulações para prever os efeitos do tratamento localizado na microestrutura e no comportamento mecânico das amostras. Os resultados indicaram que o aquecimento resistivo é capaz de gerar regiões predominantemente martensíticas quando há controle adequado do ciclo térmico. As simulações identificaram o gradiente microestrutural resultante do tratamento localizado e reproduziram com boa fidelidade o comportamento observado durante o ensaio de dobramento.

Palavras-chave — Conformação a frio; Têmpera localizada; Simulação numérica.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a crescente demanda por veículos mais leves e seguros tem impulsionado o desenvolvimento de aços de alta resistência, como o 22MnB5, este tipo de aço permite a conformação de componentes estruturais complexos, como pilares, trilhos de teto e zonas de impacto, ao mesmo tempo em que atinge às especificações de resistência mecânica após o tratamento térmico. Essa categoria de material normalmente é processada através da estampagem a quente que é amplamente difundida na indústria automotiva [1], [2].

Atualmente, estes componentes são produzidos por estampagem a quente, processo no qual o *blank* é aquecida até a faixa de 850 °C a 950 °C para promover a austenitização e é conformado em altas temperaturas e simultaneamente resfriado rapidamente no molde para permitir a têmpera de todo o componente. No entanto, essa rota exige uma infraestrutura robusta e de alta demanda energética, uma vez que utiliza fornos extensos para aquecimento por convecção e ferramentais específicos para resfriamento da peça e elevada resistência ao desgaste [3].

Neste contexto, o presente projeto tem como objetivo propor uma rota alternativa baseada na estampagem a frio, seguida por uma etapa de têmpera localizada via aquecimento por efeito Joule, empregando conceitos de *tailored blanks*. Essa abordagem permite a obtenção de componentes com variações microestruturais, e com propriedades mecânicas ajustadas de acordo com a necessidade funcional da peça, minimizando seus custos de fabricação [4], [5]. O principal benefício é promover, assim, a conservação de seu desempenho, com consequente preservação da segurança dos tripulantes do automóvel e redução do consumo energético para fabricação do componente, ou seja, contribuindo para aumentar os índices de descarbonização da indústria automotiva.

Neste trabalho foram investigados os efeitos de diferentes ciclos térmicos, com distintas taxas de aquecimento e resfriamento, sobre a transformação de fase do aço 22MnB5, bem como suas propriedades mecânicas e microestruturais. A abordagem experimental foi baseada em parâmetros industriais, considerando dois ciclos: um com taxa de aquecimento de 30 °C/s até 850 °C seguida de 5 °C/s até 930 °C, e outro com 50 °C/s até 700 °C seguida de 5 °C/s até 840 °C, além de tempos de austenitização entre 20 s e 30 s, a temperaturas de 930 °C e 840 °C, respectivamente. O objetivo foi otimizar o processo de produção de componentes estruturais com têmpera localizada, assegurando a integridade das peças. Complementarmente, o comportamento mecânico e o tratamento térmico das amostras foram avaliados por meio de simulação numérica e ensaios de dobramento, com o objetivo de verificar a capacidade preditiva da simulação em relação aos pontos de flexão da peça tratada, constituindo uma etapa inicial de calibração para aplicações futuras em componentes reais.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

2.1. ESTAMPAGEM A FRIO

A amostra projetada possui uma geometria com formato em U com comprimento de 140 mm e 50 mm de largura. Esse perfil estampado consegue garantir a presença de regiões de dobramento com diferentes curvaturas (Figura 1), assemelhando-se às regiões presentes em um componente real de barra de proteção de porta. O material utilizado para produção dessas amostras foi o 22MnB5, comumente empregado em processos de estampagem a quente, com espessura de 1,5 mm, sem revestimento, com a composição química apresentada na Tabela 1.

(a) (b)

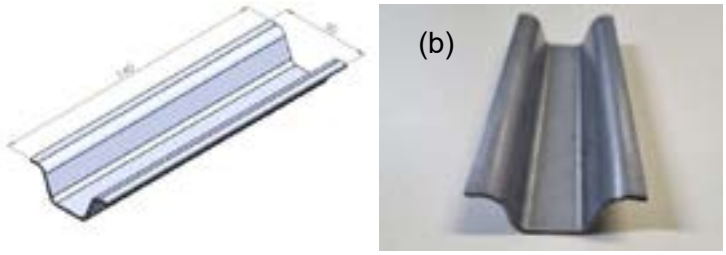


Figura 1: a) CAD informacional; b) Corpo de prova estampado para realização de testes de tratamento térmico localizado por resistência na Gleeble.

Tabela 1: Composição química do aço 22MnB5.

C	Mn	Si	Al	Nb	Ti	Cr	B	Mo	N
≤ 0,25	0,90 - 1,50	0,10 - 0,25	≤ 0,05	≤ 0,06	≤ 0,05	≤ 0,40	≤ 0,0060	≤ 0,10	≤ 0,0050

2.2. AQUECIMENTO RESISTIVO LOCALIZADO

A definição dos ciclos térmicos a serem aplicados ocorreu após testes com diferentes taxas de aquecimento, temperaturas e tempos de austenitização. A otimização visou minimizar o tempo de processo, levando em conta a necessidade de controle de taxa de aquecimento para evitar *overshoot* de temperatura, devido à inércia térmica do sistema, e o objetivo de se obter uma microestrutura majoritariamente martensítica na região central das amostras. Dessa forma, foram selecionados dois ciclos: um com 30s em uma temperatura de austenitização de 930 °C, considerando a temperatura usual de processos de estampagem a quente, e outro a 840 °C por 20s, próxima à temperatura crítica para austenitização do aço (Tabela 2) [2], [6]. As variações de tempo e temperatura foram realizadas para compreender o efeito de cada parâmetro no processo de têmpera, considerando sempre a manutenção de baixos tempos de austenitização e de ciclo completo de processamento das peças.

Tabela 2: Ciclos térmicos aplicado no simulador Gleeble.

Ciclo	Taxa de aquecimento	Temperatura de austenitização	Tempo de austenitização
01	30°C/s até 850°C + 5°C/s	930°C	30 s
02	50°C/s até 700°C + 5°C/s	840°C	20 s

Os testes físicos foram realizados em um simulador termomecânico Gleeble® 540, utilizando garras de cobre projetadas especificamente para encaixe das amostras, conforme mostrado na Figura 2a. Todos os ensaios foram executados em atmosfera ambiente, sem uso de vácuo ou gás inerte. O controle de temperatura foi feito na região central da amostra, por meio de um termopar do tipo K soldado à superfície, enquanto um segundo termopar foi posicionado próximo às garras, resfriadas com circulação de água, para monitoramento da temperatura na zona de transição (Figura 2b). Nos dois casos, o resfriamento foi feito com jato de ar aplicado diretamente na região central.

(a) (b)

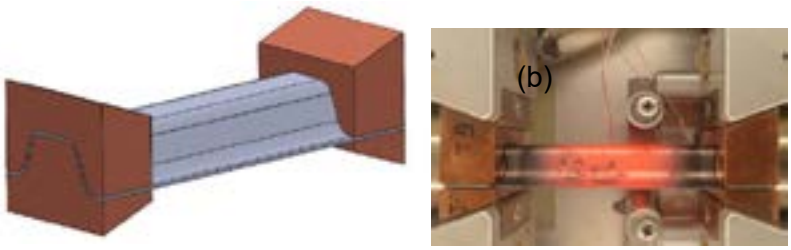


Figura 2: a) Montagem 3D CAD das garras da Gleeble *projetadas; b*) Aquecimento localizado da amostra no simulador termomecânico Gleeble.

2.3. ESTAMPAGEM A QUENTE

Para fins de comparação, foram produzidas amostras com o mesmo perfil pelo processo convencional de estampagem a quente. Chapas planas de 1,5 x 140 x 70 mm foram aquecidas à temperatura de 930°C durante 5 minutos em um forno convencional. Posteriormente, as chapas foram transferidas para a prensa em uma faixa de tempo de 4 a 7 s e permaneceram na matriz por aproximadamente 4 s até o contato completo da matriz superior, posteriormente permaneceram sobe o engaste da matriz por 4 s até o resfriamento e então removidas da prensa em tempo médio de 2 s.

2.4. CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E MICROESTRUTURAL

Para caracterização microestrutural, as amostras foram cortadas para análise da seção transversal na posição central da região aquecida, embutidas, lixadas, polidas e atacadas com Nital em concentração de 2% para revelação das fases presentes. As análises foram feitas em um microscópio eletrônico de varredura (MEV) JEOL JSM-6510LV com filamento de tungstênio, operado com voltagem de aceleração de 20 kV e distância de trabalho de 10 mm.

A caracterização mecânica ocorreu através de ensaios de dureza Vickers feitos nas mesmas superfícies analisadas com utilização do microdurômetro Wilson Instruments, modelo 422 MVD, com carga de 1 kgf, com a aplicação dez indentações na região transversal.

2.5. ENSAIOS DE DOBRAMENTO

O dobramento das amostras (Figura 3) foi realizado com velocidade de 0,5 mm/s e distância entre os suportes de 100 mm, sem fixação das extremidades da peça, condizente com a metodologia utilizada por [7]. Mesmo não sendo uma condição real de aplicação de uma peça automotiva, é capaz de proporcionar a avaliação dos pontos de dobramento. O punção utilizada possuía 10 mm de diâmetro e foi acoplado a uma célula de carga de 18 kN. O deslocamento total do ensaio foi definido em 50 mm.

Figura 3: Montagem do ensaio de dobramento das amostras.

2.6. SIMULAÇÕES NUMÉRICAS DE AQUECIMENTO E DOBRAMENTO

A simulação foi desenvolvida no *Simufact Forming*, com uso dos módulos de *resistance welding* para produção da amostra tratada termicamente de forma localizada e de *cold forming* para o dobramento das amostras tratadas. Essas simulações foram geradas para permitir a comparação com os resultados dos ensaios físicos de dobramento realizados e servir de suporte para a posterior simulação de dobramento da peça real (*door beam*).

Uma malha foi criada para simulação com uso do *MSC Apex*, que possibilitou a geração de elementos hexaédricos com dimensão de 1 mm com 3 elementos na direção da espessura da peça.

A aplicação de corrente foi utilizada de forma a representar exatamente o mesmo ciclo térmico obtido com os ensaios na Gleeble, mantendo, assim, as taxas de aquecimento e o tempo de processo de têmpera (Figura 4).

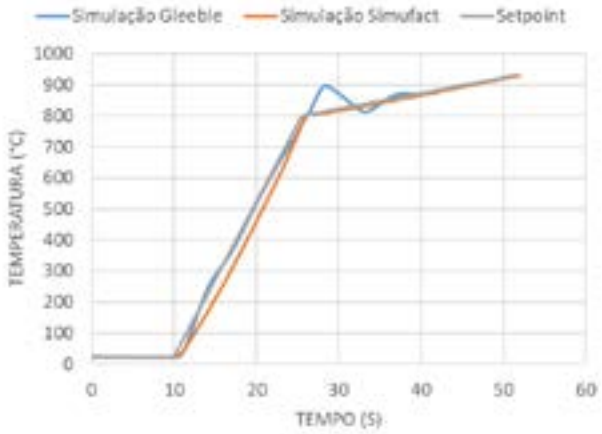


Figura 4: Calibração da simulação de aquecimento resistivo e comparação com os resultados de temperatura obtidos com uso do simulador termomecânico gleeble.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. MATERIAL COMO RECEBIDO

A microestrutura do aço 22MnB5 estado como recebido (laminado) é mostrada na Figura 5. A microestrutura é composta majoritariamente por grãos de ferrita com precipitados de cementita no entorno. A dureza do material nesse estado inicial se manteve em torno de 200 HV.

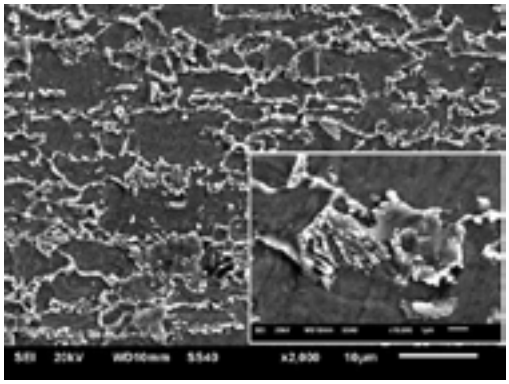


Figura 5: Microestrutura do aço 22MnB5 no estado inicial.

3.2. SIMULAÇÕES FÍSICAS DE AQUECIMENTO E CARACTERIZAÇÃO

Na Figura 6 são exibidas as microestruturas das diferentes regiões da seção transversal da amostra, na posição central ao longo de seu comprimento, após o ciclo 01 e resfriamento com ar comprimido. Em todos os pontos da curva, a microestrutura se apresenta majoritariamente martensítica. Nas regiões A e E, a martensita se apresentou com algum grau de revenimento, denotado pela cor esbranquiçada associada à presença de carbonetos. Nas regiões B, C e D, em meio à martensita, é possível observar alguns grãos poligonais correspondentes à fase ferrítica. A dureza por toda a região transversal da amostra se estabeleceu em torno de 400 HV, considerando a morfologia mais grosseira apresentada pela martensita nesses pontos.

A Figura 7 mostra a microestrutura das diferentes regiões ao longo do perfil da amostra estampada em sua posição central submetida ao ciclo 02. Nas regiões B-F, a microestrutura se mostra, novamente, majoritariamente martensítica, e relativamente refinada em relação à microestrutura observada após a aplicação do ciclo 01. Na região A, entretanto, foi observada uma fração relativamente elevada da fase ferrítica. Como a região A é um local de incidência direta do meio de resfriamento da Gleeble, entendeu-

se que a presença de ferrita pode ser atribuída a um contato insuficiente da garra neste local, o que, associado à temperatura de austenitização relativamente baixa no restante da peça, levou a uma austenitização incompleta neste local.

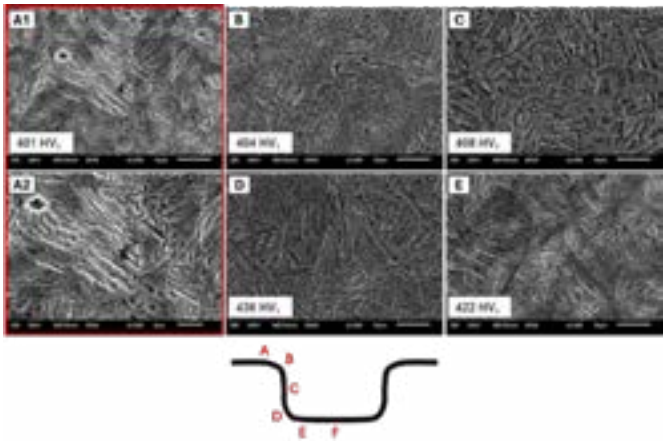


Figura 6: Imagens de MEV com sinal de elétrons retroespalhados de diferentes regiões da seção transversal do componente estampado a frio e submetido ao ciclo 01 na Gleeble.

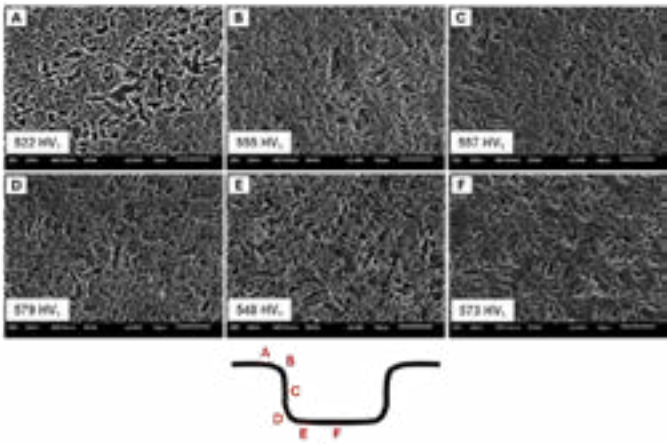


Figura 7: Imagens de MEV com sinal de elétrons retroespalhados de diferentes regiões da seção transversal do componente estampado a frio e submetido ao ciclo 02 na Gleeble.

As microestruturas da chapa estampada a quente podem ser observadas na Figura 8. Novamente, os valores de dureza obtidos em cada região acompanham as imagens. Em ambos os casos, a microestrutura obtida é majoritariamente martensítica, e apresenta valores de dureza da ordem de 530-580 HV1.

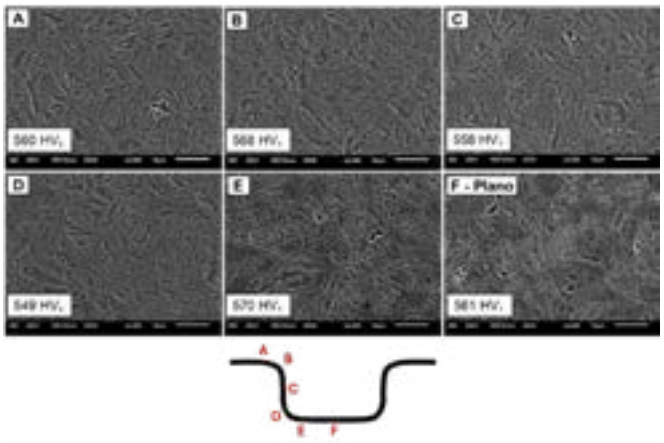


Figura 8: Imagens de MEV com sinal de elétrons retroespalhados de diferentes regiões da seção transversal do componente estampado a quente.

3.3. SIMULAÇÃO NUMÉRICA E COMPORTAMENTO MECÂNICO DURANTE DOBRAMENTO

A simulação do aquecimento por passagem de corrente desenvolvida para ambos os ciclos de aquecimento (930°C e 840°C) foi capaz de avaliar que a temperatura de austenitização controla o comprimento da região de transformação martensítica e pode ter relação com o nível de homogeneidade dessa região. Na Figura 9, esse comportamento fica claro: a amostra tratada a 840°C limita a região de martensita a, aproximadamente, 25 mm, enquanto a amostra tratada a 930°C permite um comprimento maior, de 45 mm, para essa região.

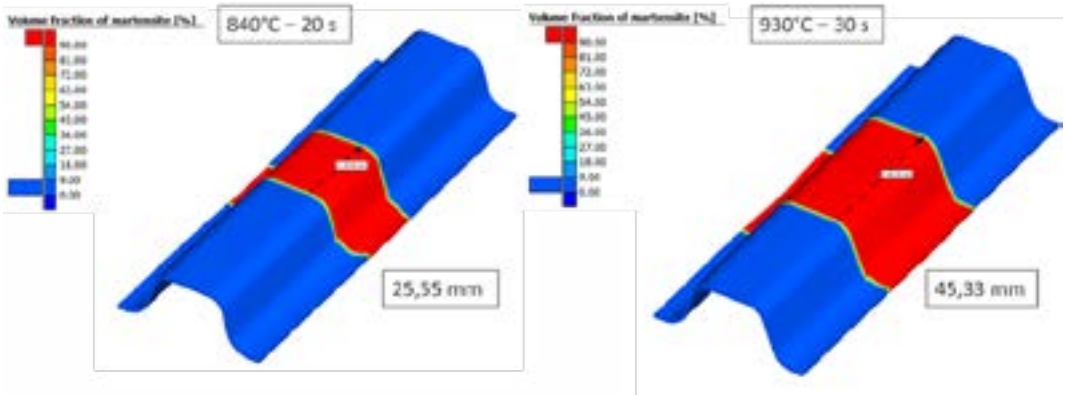


Figura 9: Variação do comprimento da região de transformação martensítica associada à temperatura de austenitização utilizada no ciclo térmico de aquecimento por resistência.

A simulação foi capaz de prever o diferente comportamento detectado nos ensaios de dobramento da amostra tratada parcialmente (Figura 10a), indicando que os pontos de flexão ocorreriam logo após a região de transição, como pode ser visto na Figura 10b. Esse comportamento da modificação do ponto de intrusão pode ser significativo para o uso do reforço lateral da porta nos automóveis e indica que essa situação também pode estar presente na simulação do dobramento da peça real.

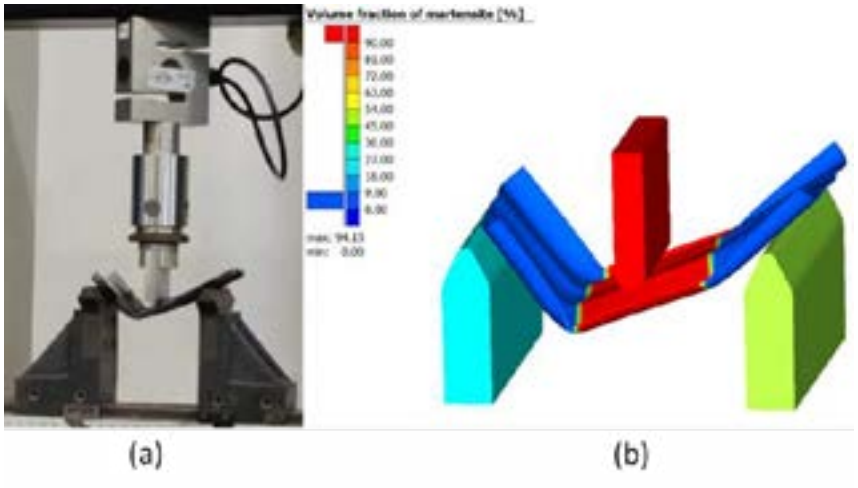


Figura 10: Ensaio de dobramento das amostras tratadas com temperatura de 930°C (a) Ensaio físico (b) Simulação.

Durante os ensaios, um comportamento específico foi observado para as peças tratadas termicamente a 930 °C, com uma maior região de martensita. Nessas amostras, a flexão não ocorre somente na região central, e sim nas regiões logo após a zona de transição microestrutural (Figura 11).

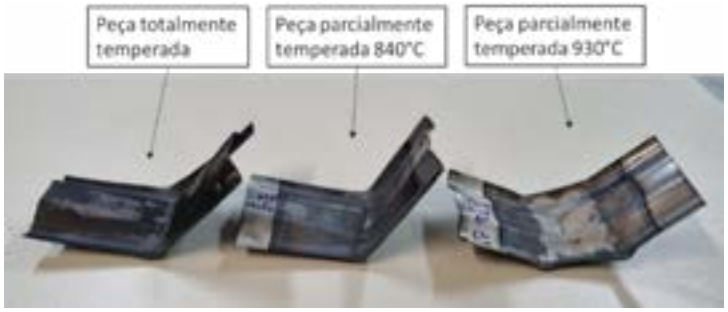


Figura 11: Comportamento das diferentes condições de amostras no ensaio de dobramento.

4. CONCLUSÃO

O ciclo térmico com temperatura de austenitização de 930 °C, seguido de resfriamento ao ar forçado, mostrou-se o mais promissor para aplicação nas amostras, por garantir uma faixa de dureza acima de 400 HV que garante alta resistência mecânica e um certo nível de alongamento, que é adequado para aplicação em componentes automotivos. Já o ciclo com temperatura de 840 °C foi capaz de promover a austenitização e a posterior têmpera, entretanto resultou em aumento excessivo da dureza e não assegurou boa homogeneidade microestrutural.

O estudo dos diferentes ciclos térmicos permitiu avaliar o potencial da tecnologia de tratamento térmico localizado por aquecimento resistivo, indicando que a rota testada pode ser viável para aplicação em peças reais, desde que possibilite o tratamento de comprimentos específicos.

A simulação numérica permitiu prever o gradiente microestrutural gerado durante o tratamento térmico localizado, além de indicar o possível comportamento mecânico durante o ensaio de dobramento. A tendência de concentração dos pontos de curvatura nas regiões de variação microestrutural mostrou-se uma característica potencialmente positiva, que deve ser investigada de forma mais aprofundada.

REFERÊNCIAS

[1] H. Karbasian and A. E. Tekkaya, “A review on hot stamping,” J Mater Process Technol, vol. 210, no. 15, pp. 2103–2118, 2010.

[2] T. and Taylor and A. Clough, “Critical review of automotive hot-stamped sheet steel from an industrial perspective,” Materials Science and Technology, vol. 34, no. 7, pp. 809–861, 2018.

[3] K. Mori et al., “Hot stamping of ultra-high strength steel parts,” CIRP Ann Manuf Technol, vol. 66, no. 2, pp. 755–777, 2017, doi: 10.1016/j.cirp.2017.05.007.

[4] M. Merklein, M. Johannes, M. Lechner, and A. Kuppert, “A review on tailored blanks - Production, applications and evaluation,” J Mater Process Technol, vol. 214, no. 2, pp. 151–164, 2014, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2013.08.015.

[5] M. Merklein, M. Wieland, M. Lechner, S. Bruschi, and A. Ghiotti, “Hot stamping of boron steel sheets with tailored properties: A review,” J Mater Process Technol, vol. 228, pp. 11–24, Feb. 2016, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2015.09.023.

[6] D. A. Da Costa Ximenes, L. P. Moreira, J. E. R. De Carvalho, D. N. F. Leite, R. G. Toledo, and F. M. Da Silva Dias, “Phase transformation temperatures and Fe enrichment of a 22MnB5 Zn-Fe coated steel under hot stamping conditions,” Journal of Materials Research and Technology, vol. 9, no. 1, pp. 629–635, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.jmrt.2019.11.003.

[7] N. Li, J. Lin, T. A. Dean, D. Dry, and D. Balint, “Concept validation for selective heating and press hardening of automotive safety components with tailored properties,” in Key Engineering Materials, Trans Tech Publications Ltd, 2014, pp. 1124–1131. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.622-623.1124.

44º SENAFOR

28th International Forging Conference
13th International Sheet Metal Forming Conference / 10th BrDDRG Congress
13th International Conference on Materials and processes for Renewable Energies – Brazil/RS
2nd International Conference on Innovation in Materials and Manufacturing
Hotel Plaza São Rafael – P. Alegre RS, October 2-4, 2024

Modelagem numérica por elementos finitos do processo de estampagem incremental e modelo de dano dúctil no Abaqus

Finite element numerical modelling of the incremental forming process and Abaqus ductile damage model

Paulo Henrique Silva Santos [1]
Andrea Madeira Kliauga [2]
Danielle Cristina Camilo Magalhães [3]
Luciana Montanari [4]
Sérgio Henrique Evangelista [5]

RESUMO

Com o objetivo de fabricar peças com ampla diversidade geométrica e baixo custo de produção, o processo de estampagem incremental de ponta única (SPIF, Single Point Incremental Forming) apresenta-se como uma alternativa viável. Este processo é caracterizado pelo movimento de uma punção na forma de uma ferramenta com ponta semiesférica, cuja trajetória é programada e executada em centros de usinagem CNC (Computer Numeric Control). Disto, esta ferramenta percorre um caminho predefinido sobre a superfície da chapa para impor deformações plásticas de forma incremental até a conformação do perfil desejado. Neste trabalho foi estudado um modelo numérico por meio da técnica de Elementos Finitos (FE, Finite Elements) aplicado ao processo SPIF por meio do programa comercial ABAQUS com foco em se avaliar como o emprego do modelo de dano dúctil no programa seria capaz de predizer o comportamento mecânico do processo modelado diante do experimentado e registrado em curvas limite de conformação (CLC).

[1] Mestrando, Univ. Federal de São Carlos – UFSCar, Brasil. paulohenrique2604@outlook.com
[2] Profa. Dra. Univ. Federal de São Carlos – UFSCar, Brasil. kliauga@ufscar.br
[3] Profa. Dra. – UFSCar, Brasil. ccamilo@ufscar.br
[4] Profa. Dra. Esc. de Eng. de São Carlos – EESC USP, Brasil. montanar@sc.usp.br
[5] Prof. Dr. – UFSCar, Brasil. toddyprof@ufscar.br

Na implementação do modelo FE, foi analisado o processo SPIF para uma geometria específica, cujas condições diversas apoiaram-se em experimentos físicos prévios, considerando-se três trajetórias distintas da punção, nas quais se variou o ângulo inicial para penetração da ferramenta na peça (20°, 25° e 30°) e se empregou rotação da mesma enquanto esta realizava sua trajetória. As propriedades de material relacionaram-se aos dados obtidos em ensaios padronizados feitos em amostras construídas a partir do material híbrido de folhas de alumínio AA1050/AA7050, obtido por junção por laminação acumulada (ARB — Accumulative Roll Bonding) na condição de pré-aquecimento a 450 °C. Os dados para o modelo de dano dúctil foram inferidos a partir da porção remanescente das curvas dos ensaios de tração sobre as amostras. Os resultados avaliados apoiaram-se na comparação das trajetórias do espaço das deformações plásticas ($\varepsilon_1 \times \varepsilon_2$) para os dados numéricos e experimentais no diagrama da curva limite de conformação (CLC) do material híbrido na condição de estudo do processo SPIF. Os resultados obtidos de forma numérica aproximaram-se dos obtidos nos experimentos. Das discrepâncias encontradas, destacaram-se aquelas relacionadas à implementação do dano dúctil no modelo ABAQUS a partir dos parâmetros de triaxialidade, da deformação máxima obtida na fratura e na própria evolução da danificação. Os problemas de implementação encontrados são discutidos no trabalho para a proposição de rotas futuras de investigação.
Palavras-chave: Junção por laminação acumulativa; Conformação incremental; Elementos finitos, Conformabilidade, Dano dútil.

ABSTRACT

Mechanical manufacturing companies are aiming at the single-point incremental sheet metal forming process (SPIF) as a low-cost alternative for newly developed mechanical parts. For this process, a tool trajectory is performed on Computer Numeric Control (CNC) machines to impose incrementally paced plastic strains on the formed part until the final shape is reached. This work is based on a Finite Element (FE) Abaqus model for the SPIF process for studying the feasibility of its ductile damage model as a tool for predicting the mechanical performance of the formed part in terms of its forming limits. A particular geometry was specified on the FE model by obeying geometrical aspects obtained from previous SPIF experiments, which were performed in three different cases according to a chosen value for an initial tool penetration angle over the formed part among 20°, 25°, or 30°. As it was displaced, the tool was kept with a constant angular speed of 1700 rpm. Material properties values for this FE model were obtained from tensile tests and anisotropy tests with specimens made of metal composite sheets of Accumulative Roll Bonding (ARB) applied to 1050 and 7050 aluminum alloys, with a thermal pre-heating up to 450 °C. It is worth mentioning that specific specimens from these composites were previously tested in SPIF experiments, which also offered experimental data for comparison purposes. Material properties values for the Abaqus ductile damage model were calculated from the final portion of stress-strain curves from tensile tests. Strain paths extracted from the SPIF physical experiments for specific measurement points were plotted over the forming limit diagram (FLD) of the composite. Also, related strain paths from FE numerical models were plotted on the same graphs for comparisons. The obtained pairs of numerical and experimental SPIF strain paths were grouped and identified by the initial tool penetration angle. It is shown that the numerical predictions followed accordingly to their respective experimental sides. As a general guideline, the Abaqus damage model should be specified to study ductile materials. However, the experimental tests revealed a combination of ductility within the interposed sheets of the composite and layer slippage. The prediction of fracture sites was established in correlation to the

experimental process. In this study, it is shown the Abaqus ductile damage model can be used to predict the strain path of ARB metal parts in the SPIF process. Technical difficulties were identified during the FE model development, for example, the case of how to consider the triaxiality value for the Abaqus damage model. Also, the fracture strain value and uncertainties with the damage evolution curve beyond the ultimate tensile stress were issues in this damage modeling. Those discrepancies were discussed in this work to identify future development in the FE studies.
Key words: Accumulative roll bonding; Incremental forming; Forming; Finite elements, Ductile damage.

1. INTRODUÇÃO

Dada a crescente necessidade de fabricar novos produtos em tempos menores e com baixos custos, novos processos de fabricação vão sendo desenvolvidos tal como na prototipagem rápida e que atenda as demandas do mercado [6]. Na estampagem incremental de contato único ou ponto simples (SPIF) (*Single Point Incremental Forming*), a conformação da chapa ocorre devido ao contato da ferramenta semiesférica com a superfície da chapa em movimentos axiais incrementais ou gradativos sem o apoio de suporte ou contra ferramenta, como se apresenta na Figura 1 [4].

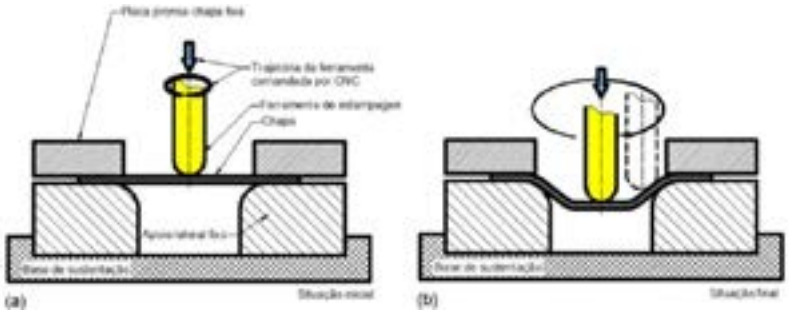


Figura 1 - Sistema de estampagem incremental de ponto simples. (a) situação inicial. (b) situação final. Adaptado de [6].

Dentre os parâmetros do processo de estampagem incremental alguns apresentam maior influência como velocidade de rotação, velocidade de avanço, incremento vertical, parâmetros da ferramenta, geometria da peça, trajetória da ferramenta, temperatura de conformação e condições de lubrificação. A rotação da ferramenta influencia o processo devido ao atrito e temperatura gerados durante a estampagem incremental e alguns autores relatam uma melhora na conformabilidade do material, enquanto outros atestam que não existe influência ou até para alguns, em que é necessário encontrar um valor ótimo da velocidade de rotação da ferramenta [1].

Em processos de conformação mecânica, a técnica de elementos finitos (EF) é capaz de auxiliar na resolução de problemas complexos como deformações geométricas, retorno elástico, afinamento, vibrações, previsão de falhas e defeitos, regiões de ruptura, seguras, enrugamentos e entre outros, além da implementação de modelos de dano [9].

O desenvolvimento de modelos de dano é essencial para prever e entender o dano e a fratura em chapas metálicas. Nos últimos anos alguns modelos constitutivos de materiais foram desenvolvidos para prever danos e fraturas dúcteis [8]. O dano dúctil é um fenômeno conhecido como um declínio progressivo das propriedades mecânicas quando um metal dúctil é submetido a deformação plástica. O mecanismo

que pode causar a falha devido ao dano dúctil envolve o crescimento, coalescência de microvazios e a nucleação que leva a formação e propagação de microfissuras até a completa fratura do material. Desta maneira, a previsão do comportamento de danos dúcteis dos materiais é essencial para projetar e desenvolver produtos e processos confiáveis. Dado o significativo impacto do dano dúctil aos limites de conformabilidade de chapas finas, integrá-lo à análise junto ao modelo constitutivo é essencial [7].

O ABAQUS® é um programa baseado no método dos elementos finitos e oferece uma estrutura geral para modelagem de falhas de materiais, o que permite a implementação de mecanismos atuando isoladamente ou simultaneamente. Desta maneira o ABAQUS® apresenta a falha do material como a perda completa da capacidade de carga, assim resultando na progressiva degradação da rigidez do material, desta forma usando a mecânica dos danos é modelado o processo de degradação da rigidez [2].

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Um experimento numérico sobre o problema da estampagem incremental foi proposto a partir dos dados experimentais do trabalho [5], sendo então modelados no ABAQUS® a chapa de compósito de alumínio AA1050/AA7050 produzido por junção por laminação acumulativa, ARB (*accumulative roll bonding*) conformado à temperatura de 450º com dimensões de 55 mm x 55 mm x 1 mm de espessura. Também foram modeladas a prensa chapas, a punção e a matriz.

O material da chapa de alumínio foi implementado como anisotrópico conforme Tabela 1, com módulo de Young (E) de 70 GPa, coeficiente de Poisson 0,3, densidade 2,7 g/cm³ e com valores de tensão e deformação verdadeiros filtrados a partir do ensaios de tração de amostras padrão, sendo inseridos de acordo com a Figura 2.

Tabela 1 - Anisotropia dos materiais. Adaptado de [5].

Material	r_0	r_{45}	r_{90}	$\bar{r}$	Δr
HM 450 °C	1.18	1.22	1.05	1.20	0.10

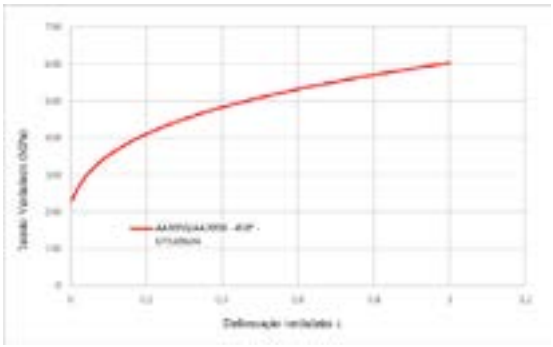


Figura 2 - Gráfico tensão x deformação das chapas multicamadas de AA1050/AA7050. Adaptado de [5].

O modelo de dano implementando no experimento numérico foi fixado como o critério de dano dúctil no Abaqus. Os parâmetros de dano implementados foram a deformação de fratura ($\bar{\varepsilon}_D^{pl}$) com 0,155, a triaxialidade constante (η) com 0,6, a taxa de deformação equivalente ($\dot{\bar{\varepsilon}}^{pl}$) com 0,0001 s^{-1} e a máxima degradação com 0,95. Além disso foi implementado o modelo tabular de evolução da variável de dano conforme a Tabela 2.

Tabela 2 - Evolução de dano implementado.

Evolução de danos	
Variável de dano (D)	**Deslocamento** (u^{pl})
0	0
0,188258481	0,11970037
0.405034689994431	0,15693537
0,99	0,22125037

O compósito multicamadas AA1050/AA7050 foi assumido como material homogêneo. A chapa de alumínio foi implementada como objeto deformável com modelo tipo casca (3136 elementos do tipo *Shell* com 4 nós e integração reduzida) e os demais componentes foram implementados como objeto de corpo rígido somente como superfície, conforme a Figura 3.

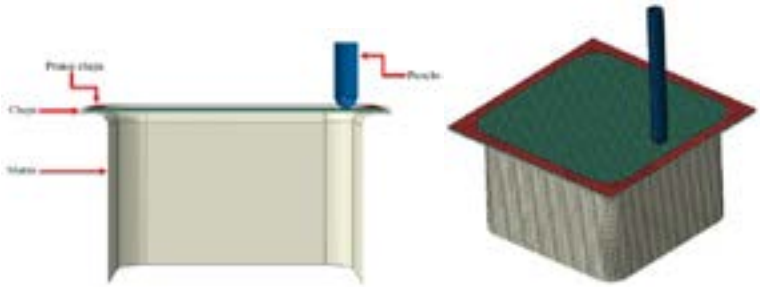


Figura 3 - Malha adotada para cada componente

Foram implementadas três trajetórias helicoidais diferentes, variando-se o ângulo inicial para penetração da ferramenta na peça em 20°, 25° e 30° em relação a horizontal, com Ø inicial de 42 mm, incremento angular de 0,5º por volta e incremento vertical Δz com 0,25 mm/volta [5]. Além disso a punção descreveu movimento de rotação e translação no sentido horário (vista de cima) e o coeficiente de atrito cinemático entre a punção e chapa e entre outros pares de faces foi implementado com 0,10 conforme lei de Coulomb e formulado utilizando o método de penalização.

4. RESULTADOS

Para se avaliar a influência da velocidade de rotação foram realizados experimentos numéricos sem rotação da ferramenta e com rotações 1750, 6000 e 10000 rpm.

Os resultados, calculados por integração explícita no tempo, foram coletados do lado inferior da chapa e analisados nos elementos que apresentaram a primeira fratura, conforme a Figura 4. Também foram analisados elementos adjacentes ao elemento crítico da fratura conforme a Figura 5.

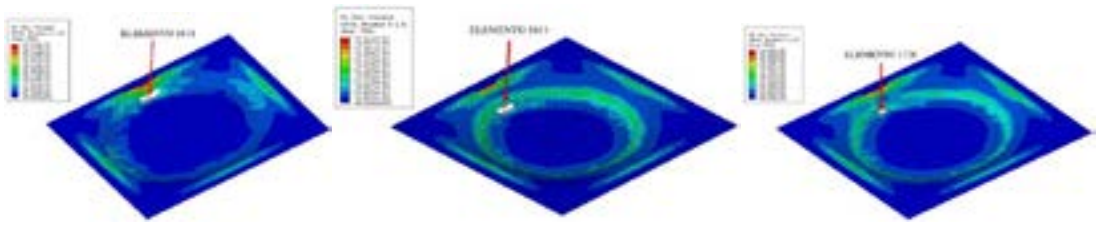


Figura 4 - Elementos que apresenta primeira fratura na condição de ângulo inicial de 20°, 25° E 30°.

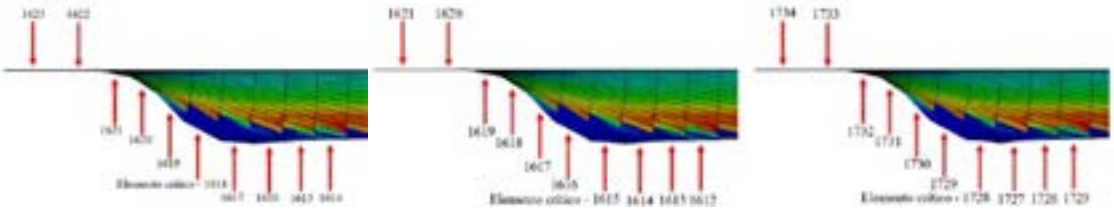


Figura 5 - Elementos adjacentes ao elemento da fratura na condição de ângulo inicial de 20°, 25° E 30°.

Os resultados dos experimentos numéricos foram analisados mediante as trajetórias de deformação plotados na curva limite de deformação (CLC) da chapa metálica. Foram analisadas as trajetórias de deformação de cada elemento, porém foram plotadas nos gráficos as trajetórias com valores das médias entre 5 elementos, sendo o elemento que sofre a fratura, dois elementos antes e dois elementos depois, conforme a Figura 5. Também foram plotadas as trajetórias das médias dos elementos que mais se aproximaram da trajetória de deformação do experimento físico, realizado exclusivamente para a rotação de 1750 rpm [5], conforme as Figuras 6, 7 e 8.

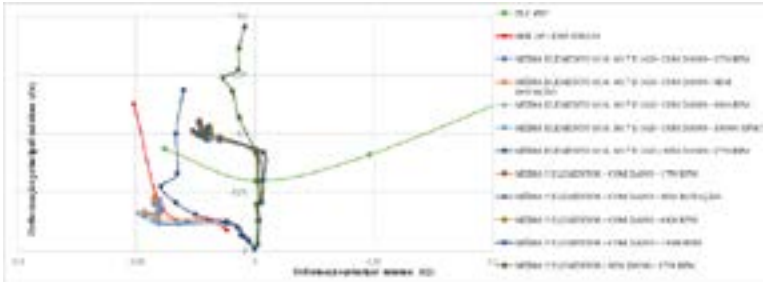


Figura 6 - Trajetória das deformações plásticas principais máximas e mínimas no plano da chapa variando a rotação e com ângulo inicial de 20°.

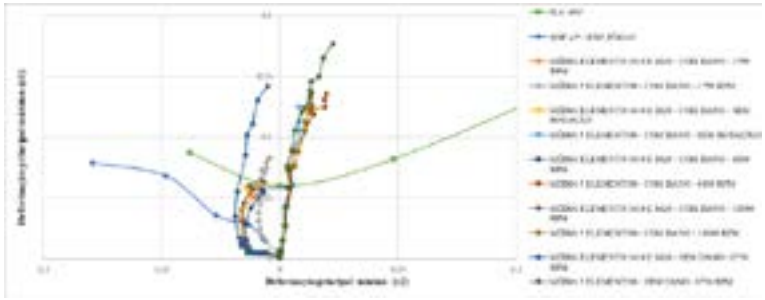


Figura 7 - Trajetória das deformações plásticas principais máximas e mínimas no plano da chapa variando a rotação e com ângulo inicial de 25°.

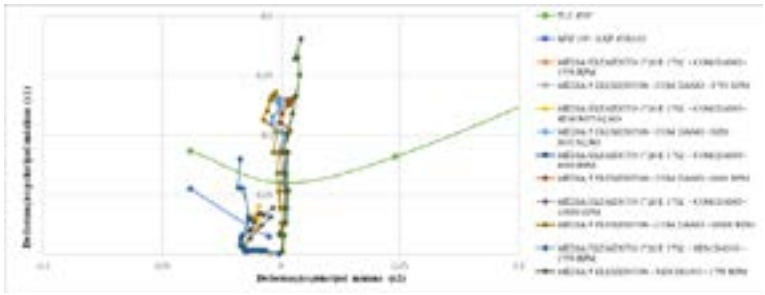


Figura 8 - Trajetória das deformações plásticas principais máximas e mínimas no plano da chapa variando a rotação e com ângulo inicial de 30°.

Conforme apresentando nas Figuras 8, 9 e 10, o que foi calculado em função de mudanças na rotação da ferramenta apresenta pouca influência em modificar a

posição das trajetórias de deformação dos experimentos numéricos e exceto pelas trajetórias de deformação média entre os elementos 1616, 1617 e 1620 para o caso com ângulo inicial de 20°, as trajetórias apresentaram um comportamento que se desviou das trajetórias dos experimentos físicos. Foi também possível analisar que existiu uma diferença entre as trajetórias com e sem o modelo de dano, sendo a principal discrepância notada quando o experimento está mais próximo em apresentar a primeira fratura, pois no início dos experimentos numéricos ambas as condições apresentam um comportamento similar. Também foi avaliada a espessura da chapa de alumínio ao longo do tempo e no momento em que o elemento apresenta a primeira fratura, conforme apresentado nas figuras 9 e 10.

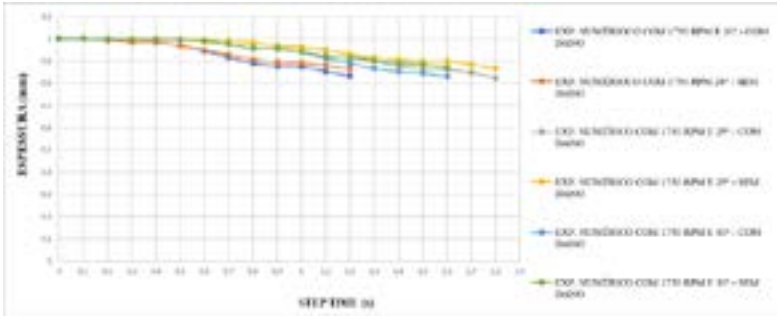


Figura 9 - Evolução da espessura dos elementos críticos com e sem danos ao longo do tempo.

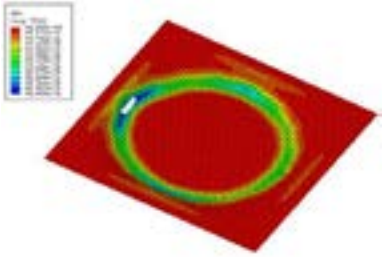


Figura 10 - Espessura dos elementos no instante da fratura - ângulo inicial de 20º e 1750 rpm.

O gráfico das espessuras ao longo do tempo e a figura da espessura no instante da fratura indicou que a implementação do modelo de dano provoca um maior afinamento da chapa de alumínio em todos os casos estudos e que existe um gradiente de espessura do material durante o processo de estampagem incremental.

Outro aspecto analisado foi a triaxialidade de tensões no lado superior e inferior da chapa de alumínio, conforme apresentado nas figuras 11,12,13 e 14.

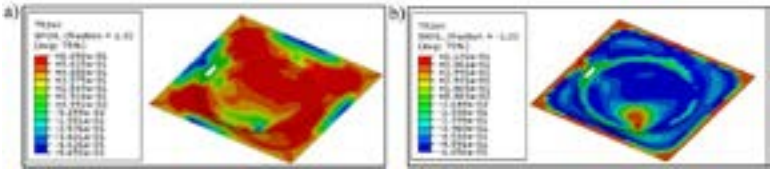


Figura 11 - Triaxialidade geral no instante da fratura com ângulo inicial da ferramenta: 20°, a) lado superior e b) lado inferior.

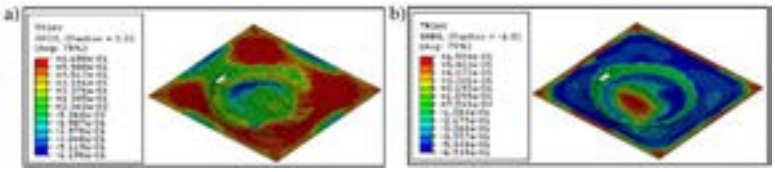


Figura 12 - Triaxialidade geral no instante da fratura com ângulo inicial da ferramenta: 25°, a) lado superior e b) lado inferior.

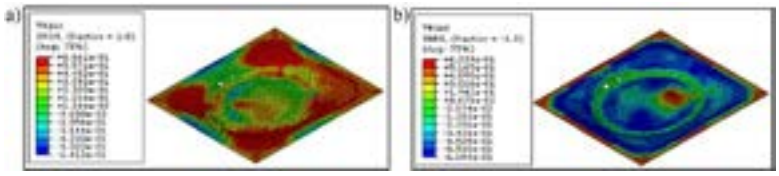


Figura 13 - Triaxialidade no instante da fratura com ângulo inicial da ferramenta: 30°, a) lado superior e b) lado inferior.

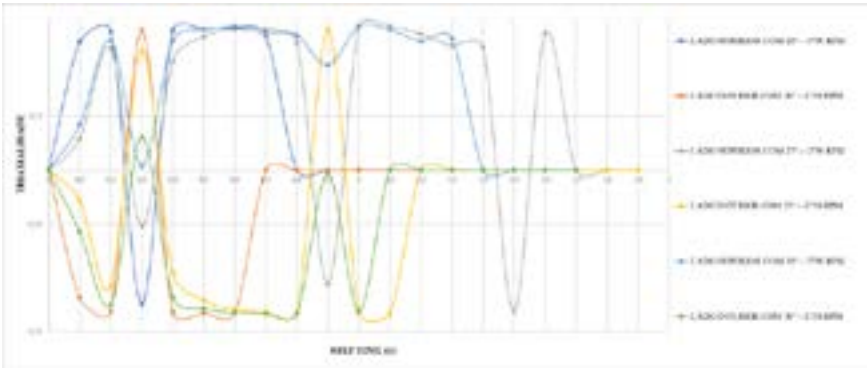


Figura 14 - Triaxialidade ao longo do tempo nos elementos críticos para os casos com 20°, 25° e 30°, com rotação da ferramenta de 1750 rpm.

As Figuras 11, 12 e 13 indicam que existe um gradiente de triaxialidade instantânea, ou seja, um campo de valores distribuídos ao longo da chapa de alumínio. Além disso o gráfico da Figura 14 apresenta que a triaxialidade não é constante no tempo, e que varia seu valor e sinal quando analisadas pelo lado interno ou externo da chapa. Observa-se que a fratura ocorre pelo lado inferior da chapa, local onde o valor da triaxialidade atinge ao valor zero de forma antecipada.

4. CONCLUSÃO

Neste trabalho buscou-se implementar no programa ABAQUS® um processo de estampagem incremental com foco em se avaliar como o emprego do dano dúctil no programa fosse capaz de predizer o comportamento mecânico do processo para o material compósito metálico analisado.

Os resultados das trajetórias de deformação são satisfatórios e indicam que o modelo implementado está próximo ao processo real, apesar das discrepâncias encontradas e nas dificuldades de implementação. A dificuldade principal encontrada associou-se às informações da curva tensão x deformação que servissem de dados de entrada para implementação do modelo de dano.

Apesar dos resultados apresentarem a triaxialidade como um valor variável, o programa ABAQUS® impõe que seja inserido um valor fixo para o modelo dano dúctil. Além disso o modelo foi implementado como homogêneo e essas considerações podem indicar e potencializar as discrepâncias encontradas nos resultados apresentados.

REFERÊNCIAS

[1] BISHNOI, P; CHANDNA, P. Formability of Aluminum Alloys During Single Point Incremental Forming: A review. International Journal of Manufacturing, Material, and Mechanical Engineering. India, v. 12, n. 1, p. 1-26, 2022. DOI: 10.4018/IJMMME.296277.

[2] DASSAULT SYSTÈMES SIMULIA CORP. Abaqus 6.14 documentation. Providence, RI, 2014. Disponível em: http://62.108.178.35:2080/v6.14/. Acesso em: 13 jun. 2025.

[3] KUMAR Y., KUMAR S. Incremental Sheet Forming (ISF). In: Narayanan R., Dixit U. (eds) Advances in Material Forming and Joining. Topics in Mining. Metallurgy and Materials Engineering. Springer. n. 26, p. 29 – 46, abr. 2015. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-81-322-2355-9_2 . Acesso em: 25 de nov. de 2023.

[4] LOPES, T. F. S. Estampagem Incremental: Compensação do Retorno Elástico e Análise à Rótula. 2013. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2013.

[5] MAGALHÃES, D. et al. Investigation of single point incremental forming parameters and forming limit curves prediction for heterostructured aluminum sheets. Materials Characterization. V.223, p. 114993, 2025. DOI: 10.1016/j.matchar.2025.114993.

[6] MAXIMILIANO, G. Estampagem incremental de múltiplos passes em chapa de latão C268. 2016. (Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica) – UFRGS, Porto Alegre, 2016.

[7] NEZHAD, M. S. S.; ABOUTALEBI, F. H. A 2D Lode improved Lemaitre's ductile damage model for damage prediction in ductile sheet metals under various loading conditions. Engineering Failure Analysis. V, 164, 108609, 2024. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2024.108609.

[8] ZENG, C. et al. A rate-dependent damage mechanics model for predicting plasticity and ductile fracture behavior of sheet metals at high strain rates. Engineering Fracture Mechanics. V. 306, 110217, 2024. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2024.110217.

[9] HALLQUIST, J. O. et al. LS-DYNA vs. 950 User Manual. Livemore Software Technology Corp. 2000. Disponível em: https://ftp.lstc.com/anonymous/outgoing/jday/manuals/DRAFT_Theory.pdf. Acesso em 09 de jul. de 2024.

44º SENAFOR

28th International Forging Conference
13th International Sheet Metal Forming Conference / 10th BrDDRG Congress
13th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies – Brazil/RS
2nd International Conference on Innovation in Materials and Manufacturing
Hotel Plaza São Rafael – P. Alegre RS, October 2-4, 2024

Análise do efeito da rugosidade em canais de resfriamento para aplicação em estampagem a quente

Bruno Caetano dos Santos Silva (1)
Luã Fonseca Seixas (2)
Luis Fernando Folle (3)
Rodrigo Santiago Coelho (4)
Gilmar Ferreira Batalha (5)

Resumo

A estampagem a quente, também conhecida como conformação com têmpera simultânea (CTS), é amplamente utilizada na fabricação de componentes automotivos. Nesse processo, o controle térmico das matrizes é essencial para garantir ciclos eficientes, estabilidade dimensional e propriedades mecânicas adequadas na peça. Tradicionalmente, os canais de resfriamento são usinados, mas apresentam limitações quanto à eficiência térmica e liberdade de projeto. A manufatura aditiva viabiliza a produção de canais conformais com geometria complexa. No entanto, esse processo frequentemente resulta em superfícies internas com elevada rugosidade. Este trabalho investiga, por meio de simulações Fluidodinâmica Computacional (CFD) utilizando o *software* SolidWorks, a influência da rugosidade interna em canais de resfriamento em matrizes de aço *maraging* 18Ni300. Foram modeladas duas geometrias: uma com canal liso e outra com rugosidade simulada por ranhuras concêntricas, submetidas a escoamento de água em regime turbulento. As matrizes simuladas estavam em contato com uma chapa de aço 22MnB5 aquecida a 815 °C, replicando condições de estampagem a quente. Os resultados indicaram que a rugosidade modificou o comportamento do escoamento, intensificando a turbulência e elevando o coeficiente médio de transferência de calor por convecção de cerca de 26,5%. Essa melhoria é atribuída ao aumento da área de contato fluido-parede e à promoção da mistura térmica. No entanto, observou-se também maior queda de pressão, o que pode impactar a eficiência global do sistema de refrigeração. Conclui-se que superfícies moderadamente rugosas podem contribuir positivamente para o desempenho térmico das matrizes, desde que sua rugosidade seja controlada. Os resultados reforçam o potencial da manufatura aditiva na otimização térmica de ferramentas complexas para CTS.

Palavras-chave: Estampagem a quente, simulação numérica, rugosidade superficial, manufatura aditiva, aço *maraging* 18Ni300.

1. INTRODUÇÃO

A estampagem a quente, também conhecida como conformação com têmpera simultânea (CTS), é um processo amplamente utilizado na indústria automotiva para a fabricação de componentes estruturais de alta resistência. Nesse processo, a chapa metálica é aquecida até atingir microestrutura austenítica, conformada a quente e resfriada rapidamente no interior da matriz, promovendo a formação de martensita diretamente no ferramental. Essa abordagem permite aliar elevada resistência mecânica das peças à redução do peso estrutural, atrelando desempenho à eficiência energética veicular [1]. Entre os parâmetros críticos da CTS, o controle térmico desempenha papel central, impactando diretamente o ciclo de estampagem, a formação da microestrutura desejada, a integridade dimensional e a durabilidade das matrizes [2,3]. A extração de calor é realizada por meio de canais internos de resfriamento, normalmente retilíneos, que apresentam limitações geométricas intrínsecas à sua rota de fabricação tradicional via usinagem.

A manufatura aditiva contempla uma série de tecnologias que tem demonstrado grande potencial para utilização em rotas de fabricação de ferramentas, como principalmente os processos de fusão em leito de pó a laser (FLP-L) e deposição de energia direcionada (DED), os quais possibilitam projetos de ferramentas com maior liberdade geométrica, utilizando conceitos avançados como o de canais conformais que seguem a forma das peças, otimizando a troca térmica. [4]. Contudo, estudos indicam que a rugosidade superficial elevada é uma característica inerente às peças fabricadas aditivamente por FLP-L. Essa característica resulta dos fenômenos envolvidos no processo, incluindo a sinterização do pó ou a fusão parcial, que podem alterar a rugosidade [5-7]. Pesquisas com este tipo de tecnologia indicaram que a rugosidade é intensificada nas superfícies da circunferência dos canais internos, principalmente nas superfícies internas superiores. Ainda, a distribuição dos poros imita fortemente a forma da peça, com maior concentração de poros nas regiões de intensificação da irregularidade da superfície, como na área superior aos canais [8,9].

A transferência de calor por convecção, fenômeno significativamente ligado ao resfriamento em matrizes de estampagem a quente através das trocas térmicas nos canais, é altamente dependente das propriedades do fluido e da velocidade de escoamento. Adicionalmente, fatores como a geometria e a rugosidade da superfície sólida desempenham um papel significativo. A complexidade da convecção como mecanismo de transferência de calor advém da dependência de múltiplas variáveis. A taxa de transferência de calor por convecção é proporcional à diferença de temperatura [10]. Em escoamentos turbulentos, a rugosidade da parede pode aumentar o coeficiente de transferência de calor por convecção por um fator de 2 ou mais [10]. Tubos com superfícies rugosas apresentam coeficientes de transferência de calor significativamente mais elevados, quando comparados a tubos com superfícies lisas. A transferência de calor em escoamentos turbulentos em tubos pode aumentar até 400%, quando a superfície se torna mais rugosa [10]. Os parâmetros termofísicos têm efeitos significativos na precisão do cálculo dos campos físicos, sendo o coeficiente de transferência de calor na interface entre a matriz e a água um dos parâmetros mais importantes na estampagem a quente [11].

A simulação numérica de processos de estampagem a quente representa uma ferramenta indispensável para a análise e o desenvolvimento de matrizes e parâmetros de processo, permitindo prever o comportamento térmico, mecânico e metalúrgico do sistema antes da fabricação dos ferramentais. Utilizando o método dos elementos finitos, é possível modelar de forma tridimensional a interação entre a chapa aquecida e as matrizes refrigeradas, considerando propriedades térmicas e mecânicas dependentes da temperatura, transferência de calor por condução e convecção, bem como as transformações de fase do material da chapa, como a formação de martensita [12]. Essa

abordagem reduz significativamente o número de iterações físicas, os custos de prototipagem e os riscos operacionais, permitindo validar virtualmente diferentes configurações de canais de resfriamento, materiais das matrizes e condições de processo [2,13].

Neste trabalho, buscou-se investigar, por meio de simulações numéricas com o modulo de simulações CFD do *software* SolidWorks, o desempenho térmico de 2 modelos de canais (sem e com rugosidade superficial interna), em troca térmica com uma chapa aquecida, simulando uma condição de trabalho típica de estampagem a quente. A análise inclui a avaliação da distribuição de temperatura ao longo da ferramenta, bem com o fluxo de calor. Os resultados esperados buscam compreender a influência da rugosidade superficial dos canais sobre o desempenho térmico do ferramental, contribuindo para o desenvolvimento de diretrizes de projeto e seleção de materiais mais eficientes considerando rotas de fabricação de matrizes com maior rugosidade superficial, como a manufatura aditiva.

2. METODOLOGIA

2.1. Materiais

Para a realização das simulações, adotou-se como material das matrizes o aço *maraging* 18Ni300 (1.2709). Considerou-se este material por se tratar de um aço comum para fabricação de ferramentais por fusão em leito de pó a laser (FLP-L), processo que pode gerar canais internos com superfícies mais rugosas que por meios convencionais, como usinagem. Como material da chapa, definiu-se o aço 22MnB5 (PHS 1500). A Tabela 1 apresenta as propriedades mecânicas e térmicas correspondentes a esses dois materiais.

Tabela 1. Propriedades dos materiais utilizados na simulação numérica.

Propriedade	Aço *maraging* 18Ni300 (matriz)	Aço 22MnB5 (chapa)
Densidade (kg/m³)	8000	7820
Tipo de condutividade	Isotrópica	Isotrópica
Condutividade térmica (W/mK)	25,2	Figura 1
Calor específico (J/kgK))	450	

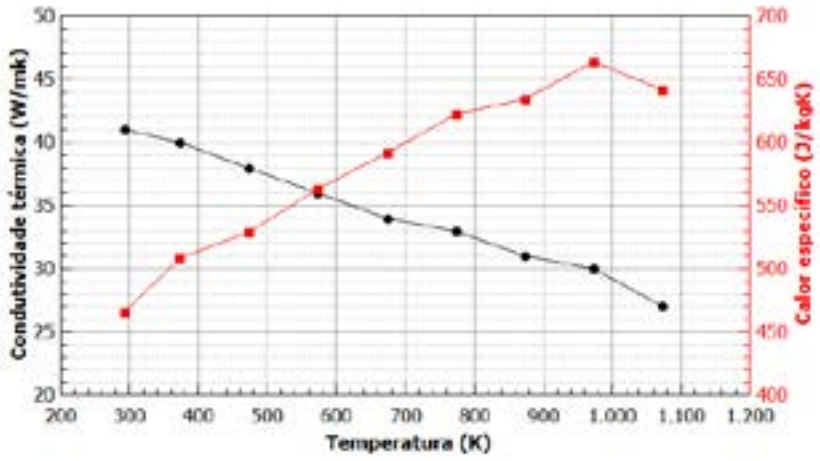


Figura 1. Propriedades do material da chapa para Condutividade térmica e Calor específico, variáveis em condições de altas temperaturas. Baseado em [14].

2.2. Modelo da ferramenta experimental

Para desenvolvimento do projeto do canal de teste foi considerado de um modelo com forma geométrica simples, com finalidade de facilitar a compreensão dos fenômenos térmicos envolvidos no processo. No desenvolvimento do projeto, foram considerados como parâmetros principais o diâmetro dos canais de resfriamento, a distância entre o centro dos canais e a superfície da cavidade da matriz, uma vez que esses fatores têm influência direta sobre o desempenho térmico da ferramenta [4]. As duas configurações de matrizes compartilharam as mesmas características geométricas globais (incluindo comprimento, largura e altura da matriz), além de manterem constantes o diâmetro dos canais (8 mm).

O diâmetro dos canais de resfriamento levou em conta tanto a espessura da chapa metálica quanto as limitações inerentes ao processo de fabricação por FLP-L. Para a espessura de chapa adotada, igual a 1,5 mm, foi selecionado um diâmetro de 8 mm, conforme diretrizes técnicas aplicáveis a *blanks* com espessura inferior a 2 mm [4, 15].

O modelo proposto de ferramenta experimental é mostrado na Figura 2. Este modelo simplificado possui um único canal longitudinal. Para simular a rugosidade na superfície do canal, foram inseridos anéis de 1 mm de espessura e 7 mm de diâmetro, na sessão central do canal. Estes anéis geram “dentes” ou “serrilhados” no perfil superficial interno dos canais, simulando o efeito de rugosidade superficial, para investigar o impacto nas características de fluxo e troca térmica do fluido refrigerante.

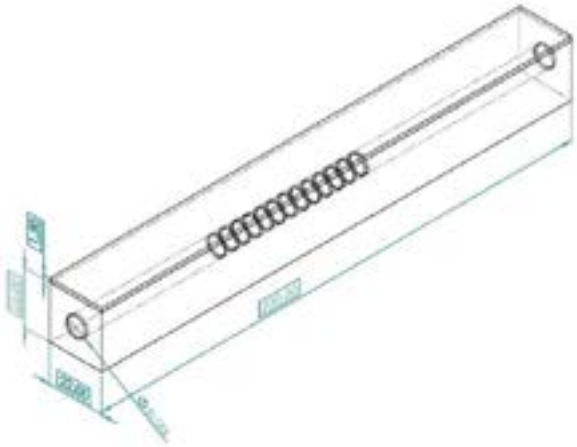


Figura 2. Modelo e dimensões do canal com rugosidade simulado pelos anéis centrais.

2.3. Simulação numérica CFD

Foi utilizado o modulo de CFD (*Computational Fluid Dynamics*) do *software SolidWorks* para a realização das simulações numéricas de trocas térmica com fluxo de fluido refrigerante nos canais pelo método de elementos finitos, utilizando os parâmetros descritos na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros configurados nas simulações CFD.

Parâmetro	Configuração
Pressão ambiente (atm)	1
Resistência térmica entre matriz e chapa (W/m²K)	8000
Temperatura inicial da matriz (ºC)	20
Temperatura inicial do fluido – água (ºC)	20
Temperatura inicial da chapa (ºC)	815
Tempo de simulação transiente (s)	15
Velocidade de entrada do fluido (canal sem rugosidade) (m/s)	1
Velocidade de entrada do fluido (canal com rugosidade) (m/s)	0,5
Fluxo de entrada do fluido	turbulento

A Figura 3 demonstra o perfil do fluxo configurado, que parte da entrada a esquerda, com velocidade inicial fixa, e segue até a extremidade direita.

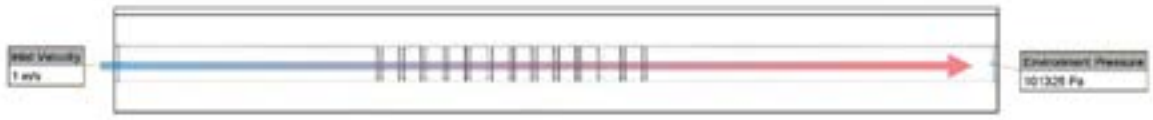


Figura 3. Configuração do fluido refrigerante (água) nas simulações.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados das trocas térmicas para as duas configurações de canais são apresentados na Figura 4. Pode-se verificar através dos resultados que a inserção de uma região com rugosidade levou a uma redução da temperatura da chapa e da matriz, nesta região em particular. Essa redução foi de cerca de 96,71 ºC para 92,73 ºC, o que representa cerca de 4,1% de redução. A troca térmica do fluido para as matrizes foram mais uniformes no modelo sem rugosidade, que apresentou uma troca média de 4,3 kW/m²K. Já no modelo com rugosidade houve uma visível redução do perfil térmico na região rugosa, gerando uma troca de 5,1 kW/m²K nessa região.

Esta melhoria de desempenho pode ser atribuída a dois fatores principais: A rugosidade afeta o escoamento do fluxo, mudando o regime para turbulento o que intensifica a troca térmica por convecção e devido ao relativo aumento da área superficial gerada pela superfície rugosa que também melhora a troca térmica. Estudos recentes mostram que configurações específicas de rugosidade podem levar a números de Nusselt mais altos, indicando melhor eficiência na transferência de calor por convecção [16]. Uma rugosidade superficial mais alta está relacionada a um maior atrito, levando a maiores perdas de pressão no fluxo, o que pode impactar negativamente o desempenho do sistema. Pesquisas indicam que existe uma faixa ideal de rugosidade que maximiza o desempenho do resfriamento e minimiza as perdas de pressão [16,17].

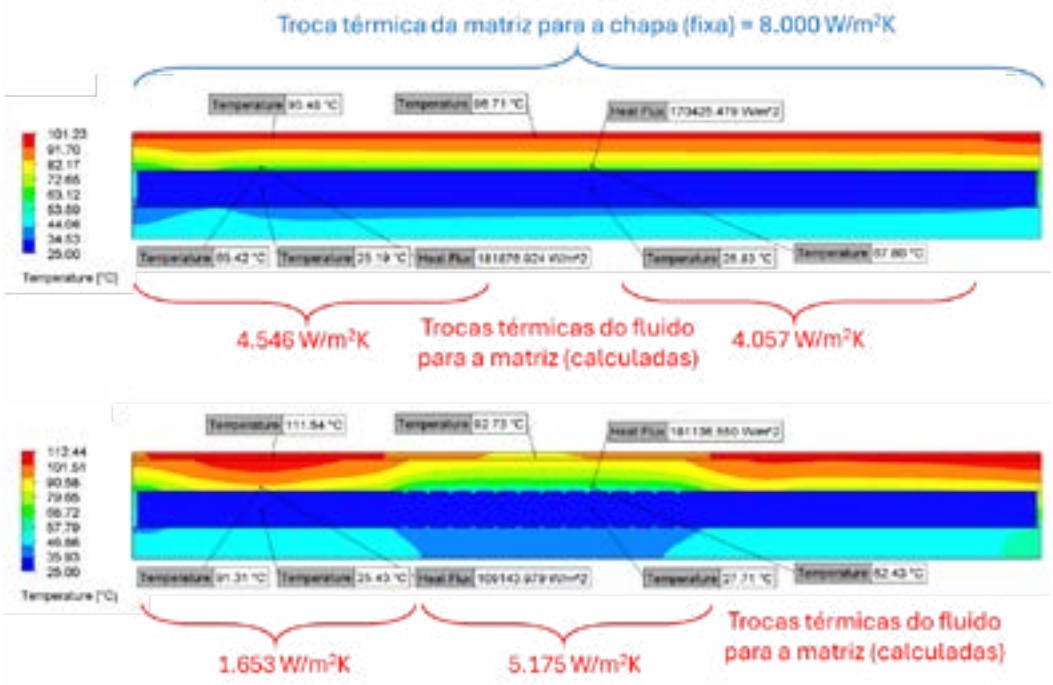


Figura 4: Resultados para as simulações CFD de transferência de calor entre fluido, matriz e chapa, nos modelos de canais a) sem rugosidade ($v_{inicial}$ = 1 m/s), b) com rugosidade ($v_{inicial}$ = 0,5 m/s).

A Figura 5 demonstra como o fluxo é afetado pela rugosidade ao compararmos as duas simulações. A região central no segundo, com a superfície irregular rugosa, tende a intensificar a turbulência. O aumento da rugosidade da superfície interrompe o fluxo laminar, promovendo turbulência, o que melhora a eficiência da mistura e da transferência de calor [16].

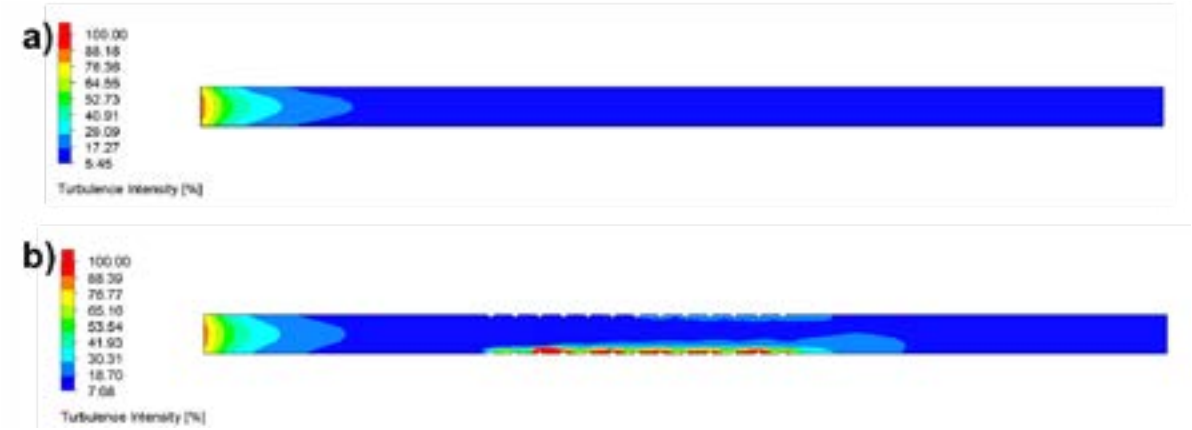


Figura 5: Resultados para as simulações CFD de intensidade de turbulência nos modelos de canais a) sem rugosidade ($v_{inicial}$ = 1 m/s), b) com rugosidade ($v_{inicial}$ = 0,5 m/s).

Os resultados de perfil de velocidade (Figura 6) revelam que, enquanto em um modelo de canal com superfície lisa, a velocidade tende a se manter constante, ao aumentar a rugosidade a velocidade do fluido é afetada com um aumento localizado, que é associado ao efeito da rugosidade no escoamento, levado a um regime turbulento. O aumento de turbulência gera alterações no perfil de velocidade, particularmente na subcamada de rugosidade [18].

Figura 6: Resultados para as simulações CFD de variação de velocidade nos modelos de canais a) sem rugosidade ($v_{inicial}$ = 1 m/s), b) com rugosidade ($v_{inicial}$ = 0,5 m/s).

Embora o aumento da rugosidade possa melhorar a transferência de calor, também aumenta a queda de pressão devido às perdas por atrito. Essa compensação pode ser gerenciada para otimizar o desempenho do resfriamento. O projeto dos canais de resfriamento deve considerar o equilíbrio entre a turbulência induzida pela rugosidade e as perdas de pressão associadas para garantir um resfriamento eficiente. Por outro lado, embora o aumento da rugosidade possa melhorar a troca de calor, valores muito elevados de rugosidade podem levar a efeitos prejudiciais na uniformidade do fluxo e na vida útil da

ferramenta, exigindo projetos e processos de acabamento cuidadosos para atingir o desempenho ideal [19,20].

Técnicas de manufatura aditiva, como a fusão em leito de pó a laser (FLP-L), permitem a criação de geometrias complexas com alta rugosidade superficial, que podem ser adaptadas para aumentar a eficiência do resfriamento [20]. Inclusive parâmetros de processo podem ser configurado para otimizar a formação intencional de rugosidade visando estes benefícios integrados ao projeto de ferramentas [16]. Tanto a escolha do material quanto o tipo de máquina de fabricação influenciam as características de rugosidade da superfície. As superfícies voltadas para baixo (como o topo do canal) são as regiões que tendem a apresentar os maiores níveis de rugosidade [21].

4. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos por simulações CFD demonstraram que a rugosidade interna em canais de resfriamento influencia significativamente o desempenho térmico de matrizes para estampagem a quente. A presença de ranhuras aumentou a transferência de calor por convecção em cerca de 26,5%, bem como a turbulência foi intensificada, favorecendo a extração de calor da chapa com redução de 4,1% da temperatura. Contudo, também gerou maior queda de pressão no escoamento. Conclui-se que rugosidades moderadas podem ser vantajosas, desde que controladas, e que a manufatura aditiva permite explorar essas geometrias com flexibilidade, reforçando seu potencial como rota tecnológica para a otimização térmica de ferramentas de CTS.

5. ABREVIAÇÕES E ACRÔNIMOS

CFD: *Computational Fluid Dynamics* (Fluidodinâmica Computacional)
CTS: Conformação com têmpera simultânea
DED: Deposição de energia direcionada
FLP-L: Fusão em leito de pó a laser

6. REFERÊNCIAS

[1] HU, P.; HE, B.; YING, L. Numerical investigation on cooling performance of hot stamping tool with various channel designs. Applied Thermal Engineering. v. 96, p. 338–351. 2016.

[2] TRAN, V.L., KIM, B.C., DO, T.T., ZHANG, S., CHANG, K., HONG, S.T., AUYESKHAN, U. CHOI, J., KIM, D.H. Cooling Performance of an Additively Manufactured Lattice Structural Conformal Cooling Channel for Hot Stamping. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. V. 23. P, 1443-1452. 2022

[3] MUVUNZI, R., DIMITROV, D.M., MATOPE, S., HARMS, T.M. Heat Transfer in a Hot Stamping Process: A Review. R & D Journal of the South African Institution of Mechanical Engineering. V. 33, P. 75-84. 2017.

[4] CHANTZIS, D., LIU, X., POLITIS, D.J., FAKIR, O.E., CHUA, T.Y., SHI, Z., WANG, L. Review on additive manufacturing of tooling for hot stamping. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. V. 109. P, 87-107. 2020.

[5] KADIVAR, M.; MCGRANAGHAN, G.; TORMEY, D. Effect of surface roughness on the performance of additive manufactured conformal cooling channels for injection moulds. Anais da 37th International Manufacturing Conference (IMC37). 2021.

[6] STIMPSON, C.K. SNYDER, J.C. THOLE, K.A. MONGILLO, D. Scaling roughness effects on pressure loss and heat transfer of additively manufactured channels. Journal of Turbomachinery. v. 139, n. 2, p. 1–10. 2017.

[7] STRANO, G. HAO, L. EVERSON, R.M. EVANS, K.E. Surface roughness analysis, modelling and prediction in selective laser melting. Journal of Materials Processing Technology. v. 213, n. 4, p. 589–597. 2013.

[8] BAIER, M. SINICO, M. PAGGI, U. WITVROUW, A. Improving metal additive manufacturing part design and final part precision using feedback from X-ray computed tomography. Anais do Joint Special Interest Group meeting between EUSPEN and ASPE Advancing Precision in Additive Manufacturing Ecole Centrale de Nantes. França. 2019.

[9] DAHMEN, T. KLINGAA, C.G. BAIER-STEGMAIER, S. LAPINA, A. PEDERSEN, D.B. HATTEL, J.H. Characterization of channels made by laser powder bed fusion and binder jetting using X-ray CT and image analysis. Additive Manufacturing. v. 36. 2020.

[10] ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. Transferência de Calor e Massa: Uma Abordagem prática. 3a Ed. MC Graal Hill. Nova Iorque. 2007.

[11] LI, H. HE, L. ZHANG, C. CUI, H. Solution of boundary heat transfer coefficients between hot stamping die and cooling water based on FEM and optimization method. Heat and Mass Transfer. v. 52, n. 4, p. 805–817. 2016.

[12] ARRIZUBIETA, J.I. CORTINA, M. OSTOLAZA, M. RUIZ, J.E. LAMIKIZ, A. Case Study: Modeling of the cycle time reduction in a B-Pillar hot stamping operation using conformal cooling. Procedia Manufacturing, v. 41, p. 50–57, 2019.

[13] CORTINA, M. ARRIZUBIETA, J.I. CALLEJA, A. UKAR, E. ALBERDI, A. Case study to illustrate the potential of conformal cooling channels for hot stamping dies manufactured using hybrid process of laser metal deposition (LMD) and milling. Metals, 8, 102. 2018.

[14] SOLIDWORKS. Banco de dados de materiais. Solidworks. 2024.

[15] LIM, W.S., CHOI, H.S., AHN, S.Y., KIM, B.M. Cooling channel design of hot stamping tools for uniform high-strength components in hot stamping process. Int J Adv Manuf Technol. V. 70. P, 1189-1203. 2014.

[16] SNYDER, J.C. THOLE, K.A. Tailoring Surface Roughness Using Additive Manufacturing to Improve Internal Cooling. Journal Of Turbomachinery. V. 142. 2020.

[17] SANDEEP, MANOHARAN, M. KUCHANA, V. LIU, J. Numerical Prediction of Surface Roughness Effect on the Performance of Internal Channels. ASME Turbo Expo 2022: Turbomachinery Technical Conference and Exposition proceedings. 2022.

[18] NARAYANAN, C. SINGH, J.S. NAUER, S. BELT, R. PALERMO, T. LAKEHAL, D. Direct numerical simulation of turbulent flow over irregular rough surfaces. Physics of Fluids. V. 36. 2024.

[19] COLANERI, A. EL SAYED, Y.M. FRANSESINI, L. LIONETTI, S. SCIARRABBA, F. ROMEO, P. BURATTINI, C. PISPOLA, G. Surface Roughness Modification Methods For AM Heat Exchangers Applications. Euro PM2023 Proceedings. 2023.

[20] LÜSCHER, P. DEFLORIN, M. VOGGESSER, M. STUBER, P. GALOUL, V. KO, M. Internal Heat Transfer Measurement on Metal-Based Additively Manufactured Channels Using a Transient Technique. ASME Turbo Expo 2022: Turbomachinery Technical Conference and Exposition proceedings. 2022.

[21] ATLAND, A.Y. CORBETT, T.M. THOLE, K.A. Impacts of Material and Machine on the Variation of Additively Manufactured Cooling Channels. ASME Turbo Expo 2024: Turbomachinery Technical Conference and Exposition proceedings. 2024.

44º SENAFOR

28ª Conferência Internacional de Forjamento - Brasil
14ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas / 11º Congresso do BrDDRG
14ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis
3ª Conferência Internacional de Inovação em Materiais e Manufatura
Porto Alegre, RS, dias 1, 2 e 3 de outubro de 2025
www.senafor.com

ANÁLISE DOS COEFICIENTES DE ANISOTROPIA DE CHAPAS PLANAS DE ALUMÍNIO 1200-H14 SUBMETIDAS A RECOZIMENTO PARCIAL E ENSAIADAS APÓS RESFRIAMENTO A TEMPERATURA SUBZERO

Daniel Angelo Zattera Milesi [(1)]
Gaston Henrique Rossa [(2)]
Júlio de Lima Palhano [(3)]

ABSTRACT

This work analyzed the experimental results of tests to determine the anisotropy coefficients under a specific cold treatment condition involving variations in temperature parameters. Flat sheets of 1200-H14 series aluminum with a thickness of 3.00 mm were subjected to partial annealing at 280 °C for 50 min to work harden the aluminum, in order to obtain a more homogeneous microstructure (avoiding large precipitates). After annealing, a cooling procedure was carried out to a temperature of -25 °C for 10 min. The results demonstrated that the samples subjected to this procedure before the tests achieved an increase in plastic anisotropy (index 'r') and in the work hardening exponent ('n'), in addition to a 31% increase in elongation in the rolling direction. It was also found that the mechanical properties of tensile strength and conventional yield strength decreased, in smaller proportions, in relation to the same quality of Aluminum only subjected to medium hardening (H14).

Keywords — Anisotropy coefficients and work hardening exponent, yield curves, aluminum alloys.

(1) Mestre em Métodos de Fabricação, Engenheiro Mecânico, Responsável técnico do LAMEC – Laboratório de Ensaios Mecânicos da Universidade de Caxias do Sul – Caxias do Sul-RS e TechnNOVA, dazmiles@ucs.br
(2) Engenheiro Mecânico, Analista de Laboratório do LAMEC – Laboratório de Ensaios Mecânicos da Universidade de Caxias do Sul – Caxias do Sul-RS, ghrossa@ucs.br
(3) Graduando de Engenharia, Técnico de Laboratório do LAMEC – Laboratório de Ensaios Mecânicos da Universidade de Caxias do Sul – Caxias do Sul-RS, jlpalhano1@ucs.br

1. INTRODUÇÃO

Em diversos segmentos da indústria manufatureira é de fundamental importância mitigar todas as propriedades mecânicas dos materiais utilizados em componentes primários e secundários para correta validação do projeto, de modo a se obter o máximo de performance destas matérias-primas nos quesitos de resistência mecânica, conformabilidade e qualidade superficial. Com isso a segurança e confiabilidade no projeto se tornam evidentes. Questões como repetibilidade nos processos industriais de manufatura (principalmente na conformação de chapas) e efeitos provenientes destes procedimentos, como fissuras e furos de encolhimento, microtrincas, delaminação, porosidade, orelhamento, inclusões, devem ser minimizados e se possível eliminados. Este trabalho teve por objetivo analisar os coeficientes de anisotropia do material Alumínio 1200-H14 (UNS A91200) antes e após o encruamento médio a frio seguido de resfriamento a temperatura de - 25 °C como alternativa para melhoria no processo de conformação da chapa.

2. MÉTODOS

O método utilizado nesta pesquisa foi baseado na realização de ensaios mecânicos normalizados [1]-[2]-[3]-[4]-[5]-[6]-[7]-[8]-[9]-[10]-[11]-[17]-[18]-[21] com três critérios principais para validação dos resultados:

i. Caracterização dos materiais (antes e após o tratamento térmico supracitado na introdução);

ii. Determinação da anisotropia plástica e do expoente de encruamento (antes e após o tratamento térmico supracitado na introdução) [12];

iii. Estudo comparativo dos resultados obtidos em i e ii (antes e após o tratamento térmico supracitado na introdução) e as devidas correlações com o estado da arte dentro da Engenharia Mecânica e Metalúrgica;

O item i forneceu as informações básicas para que o ponto de partida da pesquisa atendesse as normas de interesse, que neste caso diz respeito a classe de material Alumínio 1200-H14 (UNS A91200) [15]. Esse material foi adquirido de fornecedor nacional e com certificado de qualidade sobre as propriedades mecânicas e químicas [1]-[15].

O item ii é o estado da arte da pesquisa pois é a análise principal para coleta de dados pertinentes a hipótese de que o referido tratamento térmico é uma alternativa para melhoria nos índices de anisotropia do material, de modo que o material se torne mais isotrópico quanto for possível, mesmo o Alumínio pertencendo a uma classe com 99 % de pureza [12].

O item iii é o trabalho de comparação e correlação direta dos resultados antes e depois do encruamento médio seguido de resfriamento a temperatura subzero [12]-[14].

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Caracterização do Material

O material escolhido para esta pesquisa foi o Alumínio da série 1200-H14 conhecido como uma série de Alumínio puro (> 99 % Al). A chapa apresenta as características conforme Tabela 1 e Tabela 2 e foi adquirida no mercado nacional. A análise de composição química foi realizada por espectroscopia de emissão ótica por descarga luminescente (GD-OES) usando padrão primário. Os dados das tabelas

comparam as informações da norma do material com as condições conforme recebido (H14) e pós-tratamento de recozimento médio (a 280 °C por 50 min) com posterior resfriamento a – 25 por 10 min.

Tabela 1 – Composição química (% de cada elemento) da norma [15] versus análise realizada [3]-[8].

Designa-ção	Densida-de (g/cm³)	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
1200-Norma	2,71	1,00 Si + Fe		0,05	0,05	-	-	0,10	0,05	99,00
1200-Conforme recebido **	2,71	0,075	0,429	0,019	0,034	0,0002	0,0022	<0,001	0,015	99,397

* Utilizado método de Alumínio puro para esta análise. Média (x) de três medições;
** Na condição conforme recebido.

Tabela 2 – Propriedades mecânicas da norma versus análises realizadas [5].

Designação	Têmpera	Espessura nominal "e" (mm)	Limite de resistência a tração (MPa)	Limite convencio-nal de escoamento (MPa)	Alongamen-to mínimo (%)	Módulo de Elasticidade (GPa)
					50 mm	
1200-Norma	H14	1,20 * e * 6,30	110 (mín) – 145 (máx)	95 (mín)	5	68
1200-Conforme recebido **	H14	3,00	125	118	9	72
1200-Processado ***	H14 ***	3,00	115	102	14	72

* Tréplica de tração em corpo de prova com lo = 50 mm; Ponto da curva correspondente ao escoamento convencional = 0,2 %; U (dimensional da espessura) = ± 0,01 mm; U (LRT e LE) = ± 3 MPa; U (alongamento) = ± 0,2 mm;
** Na condição conforme recebido;
*** Na condição após encruamento a frio (processada).

Micrografias

A análise microscópica da amostra na condição somente encruada com dureza entre limites – têmpera H14 – apresentou uma microestrutura constituída por precipitados dispersos e com diferentes colorações e formas (Figura 1 – letras A, B, C, D, E e F). Esses precipitados tiveram uma tendência de acompanhar a direção de laminação indicada nas imagens pela seta branca (L).

Na condição pós-tratamento notou-se uma desfragmentação desses precipitados de forma a apresentar um padrão mais disperso dos mesmos na matriz de Alumínio. Os precipitados continuaram seguindo uma tendência de direção conforme sentido de laminação. Em sua maioria, trata-se de aglomerações de Al + Fe, tradicionalmente conhecidos como intermetálicos de aluminetos de Ferro Fe3Al e FeAl, cujo modo de falha é respectivamente clivagem e CG (contorno de grão: fratura intergranular) [16].

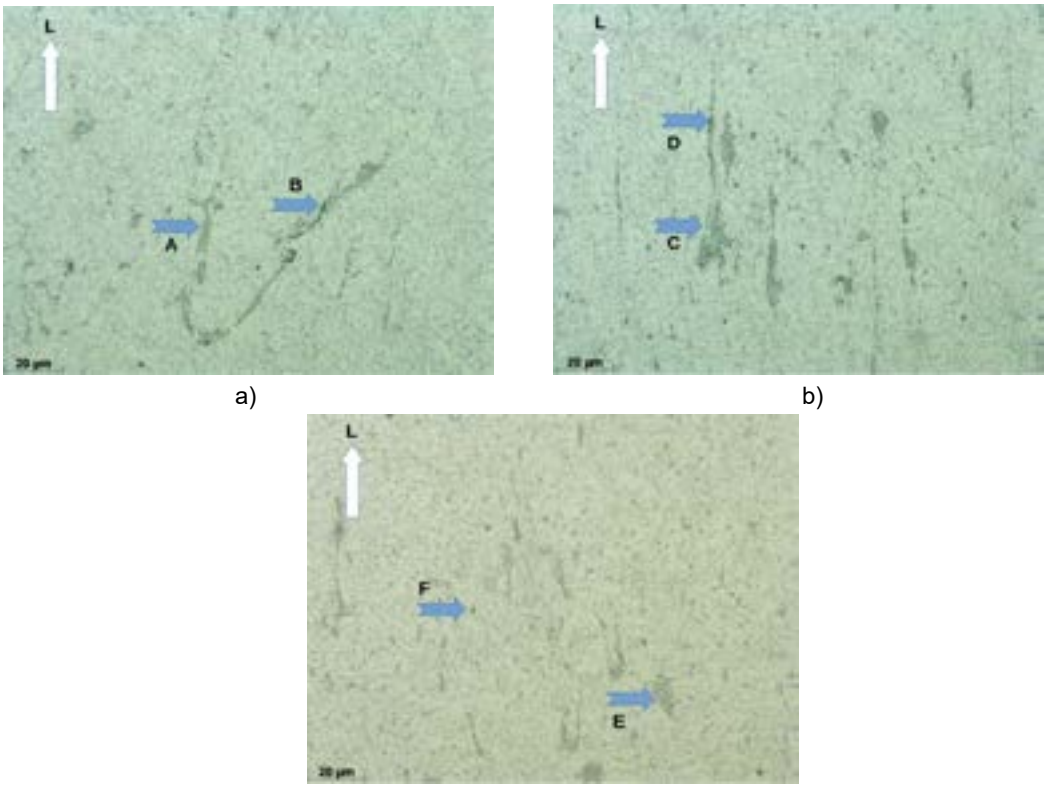


Figura 1 – Micrografia do Al 1200-H14 evidenciando precipitados (setas azuis) de diversos formatos, dispersos e alinhados com a direção de laminação (seta branca) da chapa na condição de recebimento (500x-MO, polimento manual com ataque Keller [17]): a) Planar; b) Longitudinal; c) Transversal.

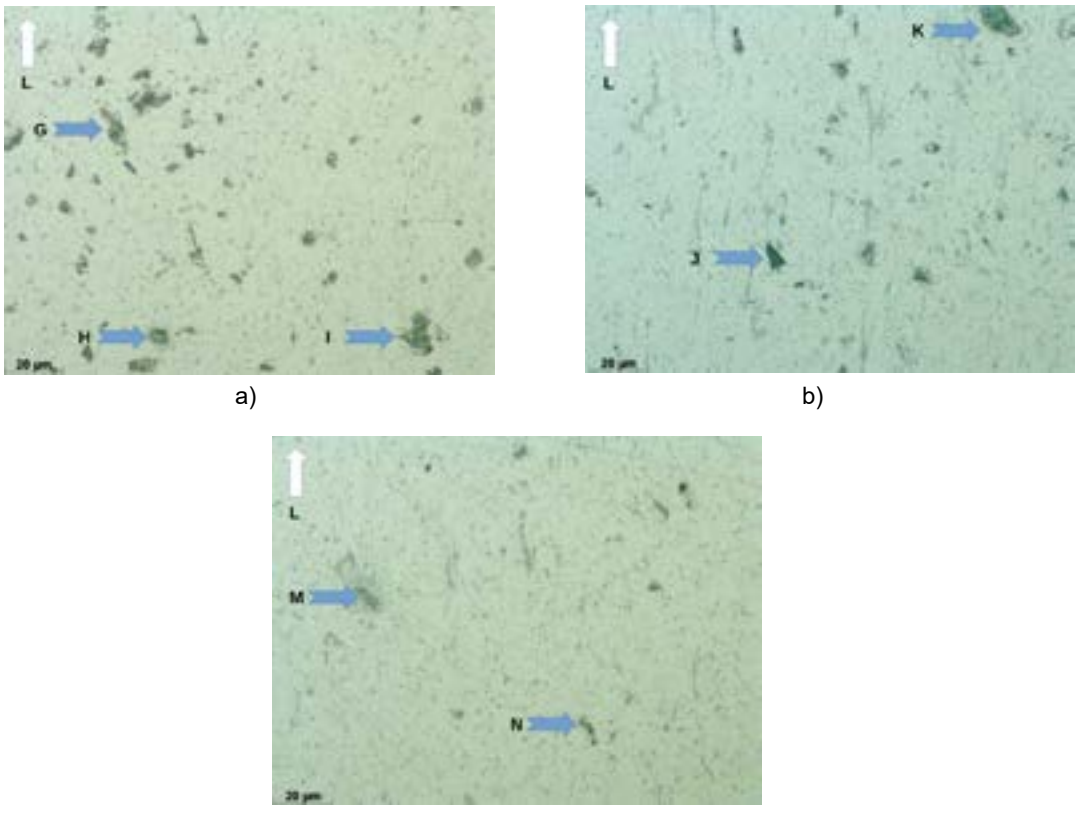


Figura 2 – Micrografia do Al 1200-H14 evidenciando precipitados (setas azuis) de diversos formatos, dispersos e alinhados com a direção de laminação (seta branca) da chapa na condição após tratamento de recozimento parcial e resfriamento subzero (500x-MO, polimento manual com ataque Keller [17]): a) Planar; b) Longitudinal; c) Transversal.

Dureza e tenacidade ao impacto (Charpy V)

A microdureza * no sentido longitudinal da amostra na condição conforme recebida forneceu valores dentro da faixa informada pela série 1200-H14, que corresponde a 35 HB (U = ± 2 HB, onde k = 2) [9]-[10].

O ensaio de impacto pelo método Charpy com entalhe em 'V' [18] demonstrou que a absorção de energia aumentou após o recozimento médio e posterior resfriamento. Isso pode ser atribuído a redistribuição dos precipitados na matriz.

Tabela 3 – Dureza e tenacidade ao impacto da norma versus análises realizadas.

Designação	Dureza (HB)	Absorção de energia (em J na temperatura ambiente em °C)	Absorção de energia (em J na temperatura sub zero de - 25 °C)
1200 - Norma	37	na****	na****
1200 – Conforme recebido **	35	5,9	5,5
1200 – Processado ***	32	7,1	7,8

* Foi realizado o ensaio de microdureza Vickers HV 0,1 (em função de ser uma chapa plana de 3,00 mm de espessura) e após foi convertido para a escala HB; U = ± 3% para dureza Vickers 0,1; U = ± 0,25 J para absorção de energia.
** Na condição conforme recebido;
*** Na condição após encruamento a frio (processada);
**** Sem informação de norma sobre essa propriedade do material.

Embutimento Erichsen

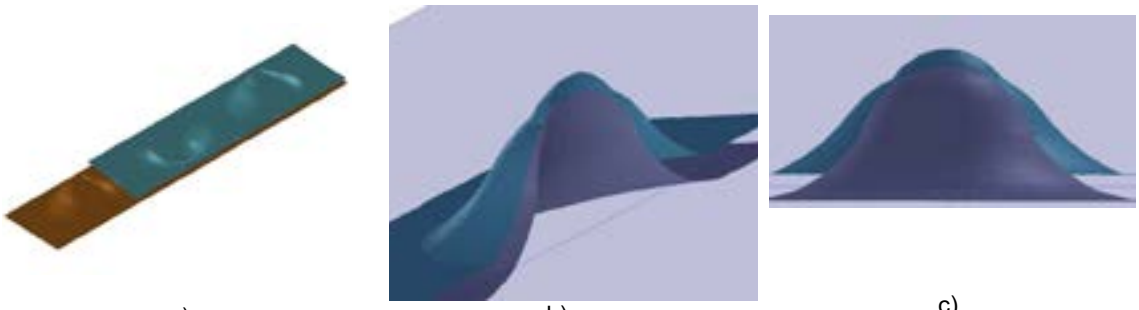
Para entender as diferenças na capacidade de deformação do material foram realizados ensaios de embutimento Erichsen [11]. O método de comparação entre as duas condições do material – conforme recebido e após resfriamento subzero – contribuiu para checar se houve mudanças significativas na questão do estiramento do material.

Tabela 4 – Valores de profundidade para embutimento Erichsen (média de 05 embutimentos para cada condição).

Designação	Valor de indentação IE (mm)
1200 - Norma	na***
1200 – Conforme recebido *	14,86
1200 – Processado **	14,93

* Na condição conforme recebido;
** Na condição após encruamento a frio (processada);
*** Sem informação de norma sobre essa propriedade do material.

Figura 3 – Foto digital de um dos embutimentos destacando o aspecto da trinca na parte superior e o perfil característico da indentação: formação de um orbicular na parte superior (sem fator de escala e em luz natural).



a) b) c)

Figura 4 – a) Escâner da amostra de chapa com embutimentos; b-c) Detalhe para o perfil de deformação na espessura da chapa (não constante). Redução de aprox. 1,01 mm na espessura na parte mais profunda do estampo.

Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) com Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS)

De acordo com os resultados das micrografias de elétrons retro espalhados e da microanálise qualitativa de raios-X por dispersão em energia, pode-se, de forma sucinta, relatar que a amostra de Alumínio 1200-HT14 na referida condição (conforme recebida) não apresenta uma quantidade expressiva de inclusões, nas regiões planar e longitudinal. Não foram identificadas inclusões estruturais, somente na região transversal foi identificada uma inclusão [16]-[19]-[20].

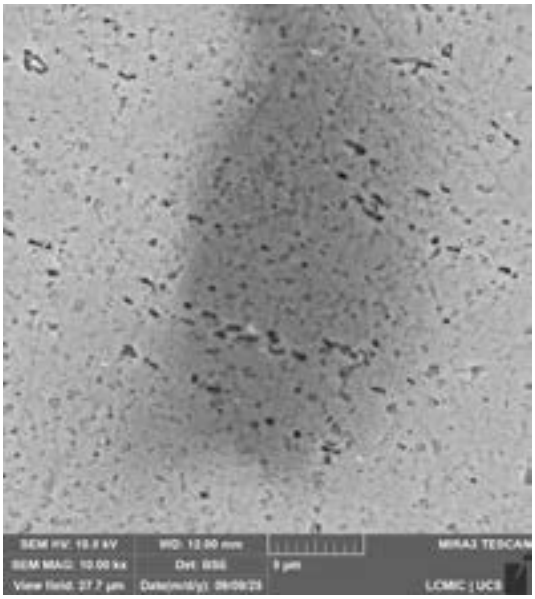
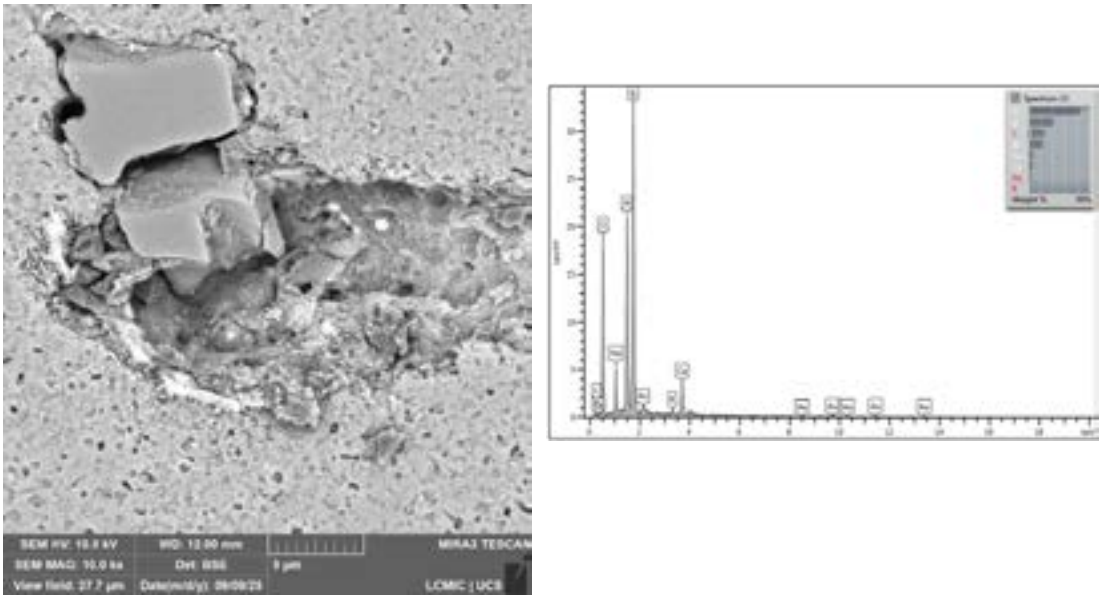


Figura 5 – Micrografia (BSE) da superfície da amostra na condição conforme recebido. Visualiza-se estruturas submicrométricas com manchas dispersas (MEV).

A microanálise qualitativa de raios-X por dispersão em energia (EDS) mostra que nas regiões planar e longitudinal tem-se majoritariamente Alumínio (Al) e apenas traços de Carbono, Ferro e Oxigênio (C, Fe, O). Na região transversal foi identificada uma inclusão de aluminossilicato NaAlSi3O8 contendo os elementos Alumínio, Cálcio, Carbono, Potássio, Sódio, Oxigênio e Silício (Al, Ca, C, K, Na, O e Si) assim como os elementos Cromo, Ferro e Níquel (Cr, Fe e Ni) [16]-[19]-[20].



a) b)

Figura 6 – Micrografia (BSE) da superfície da amostra na condição conforme recebido: a) Inclusão facetada de aluminossilicato do tipo NaAlSi3O8; b) Espectros de EDS referentes a ponto marcado na área da inclusão (grão maior).

Índices de anisotropia e encruamento

De forma geral, o Alumínio 1200-H14 é totalmente anisotrópico devido ao seu alto teor de Alumínio (99 %). O fato de não ter elementos de liga ocasiona esse problema. Mesmo assim, a anisotropia plástica e expoente de encruamento tiveram seus valores alterados após o tratamento de recozimento médio seguido de resfriamento subzero. Enquanto as propriedades mecânicas de limite de escoamento e limite de tração reduziram seus valores em uma proporção determinada, o alongamento no sentido de laminação do material aumentou substancialmente, mesmo que ainda sem bons resultados para aplicação prática [5]-[7]-[21].

Tabela 5 – Resultados dos ensaios de tração para o material na condição conforme recebido.

Designação	**Área (mm²)**	**Limite de escoamento**			**Limite de resistência à tração**			**Alongamento**			
		(MPa)	**U (MPa)**	**k**	**(MPa)**	**U (MPa)**	**k**	**Lo (mm)**	**(%)**	**U (mm)**	k
00°	37,8	108	± 1,08	2,00	118	± 1,18	2,00	50	16	± 0,016	2,00
45°	37,9	114	± 1,14	2,00	121	± 1,21	2,00	50	12	± 0,012	2,00
90°	37,5	114	± 1,14	2,00	121	± 1,21	2,00	50	12	± 0,012	2,00

Tabela 6 – Resultados dos ensaios de tração para o material na condição após resfriamento subzero.

Al 1200-H14 após resfriamento	**Área (mm²)**	**Limite de escoamento**			**Limite de resistência à tração**			**Alongamento**			
		(MPa)	**U (MPa)**	**k**	**(MPa)**	**U (MPa)**	**k**	**Lo (mm)**	**(%)**	**U (mm)**	k
00°	37,9	99	± 0,99	2,00	111	± 1,11	2,00	50	21	± 0,021	2,00
45°	37,5	102	± 1,02	2,00	110	± 1,10	2,00	50	14	± 0,014	2,00
90°	37,3	103	± 1,03	2,00	111	± 1,11	2,00	50	12	± 0,012	2,00

Tabela 7 – Resultados dos ensaios de anisotropia para o material na condição conforme recebido.

Al 1200-H14 após resfria-mento subzero	Compri-mento inicial (mm) "Lo"	Deformação aplicada (%) "Lf"	Deformação na espessura "Ɛt"	Deformação na largura "Ɛb"	Anisotropia "r"	"Δr"	Índice de Encrua-mento "n"
00°	50	1,8	0,012	0,001	0,09	-0,25	0,027
45°	50	1,8	0,012	0,004	0,29	0,10	0,013
90°	50	1,8	0,012	0,005	0,45	0,08	0,018
				Média (m):	0,28	-0,03	0,019

Tabela 8 – Resultados dos ensaios de anisotropia para o material na condição após resfriamento subzero.

Al 1200-H14 após resfria-mento subzero	Compri-mento inicial (mm) "Lo"	Deformação aplicada (%) "Lf"	Deformação na espessura "Ɛt"	Deformação na largura "Ɛb"	Anisotropia "r"	"Δr"	Índice de Encrua-mento "n"
00°	50	1,8	0,013	0,004	0,31	0,07	0,042
45°	50	1,8	0,012	0,004	0,31	0,21	0,032
90°	50	1,8	0,010	0,007	0,63	0,21	0,032
				Média (m):	0,39	0,16	0,026

4. CONCLUSÕES

Embora o motivo maior desta pesquisa seja a análise dos índices de anisotropia e encruamento do Alumínio 1200-H14 em diferentes condições, os principais resultados obtidos dizem respeito ao aumento na propriedade mecânica de alongamento do material que foram determinados pelas curvas de escoamento. Esse aumento, na condição pós-tratamento teve um valor substancial de 31 % no sentido de laminação da chapa (ângulo de 0 °). Para ângulo de 45 °, o valor de incremento na mesma propriedade foi de 16 %. No sentido de 90 °, evidenciou-se que os valores ficaram iguais. De maneira geral, o índice de anisotropia 'r' teve um aumento de 39 % em relação a condição 'conforme recebido'. Porém, mesmo com acréscimo no 'r', ainda pode-se afirmar que o material é totalmente isotrópico. Da mesma forma, o expoente de encruamento do Al 1400-H14 teve aumento de 36 %, que não chega a ser substancial esse tipo de material. O aumento no alongamento e a consequente diminuição do limite de escoamento e de tração explica a formação de orbicular durante o ensaio de embutimento Erichsen. Logo, é plausível afirmar que o pós-tratamento aplicado seguido de resfriamento a temperatura subzero não foi satisfatório para melhoria do processo de estampagem do material ou ainda, foi pouco significativo.

REFERENCES

[1] Coletânea de Normas Técnicas de Alumínio e suas Ligas. São Paulo: ABAL – Associação Brasileira do Alumínio, 2008. 758 p.

[2] ABNT NBR 6599:2007 – Alumínio e suas ligas – Processos e produtos – Terminologia. ICS 01.040.01; 77:120.10. – Segunda Edição. 10 páginas.

[3] ABNT NBR 6834:2006 – Alumínio e suas ligas – Classificação da composição química. ICS 77:120.10. Segunda Edição. 25 páginas.

[4] ABNT NBR 6835:2000 – Alumínio e suas ligas – Classificação das têmperas. 6 páginas.

[5] ABNT NBR 7549:2001 – Alumínio e suas ligas – Ensaio de tração dos produtos dúcteis e fundidos. 17 páginas.

[6] ABNT NBR 7556:2006 – Alumínio e suas ligas – Chapas – Requisitos. ICS 77:120.10. Segunda Edição.14 páginas.

[7] ABNT NBR 7823:2007 – Alumínio e suas ligas – Chapas – Propriedades mecânicas. ICS 77:150.10. Segunda Edição. 47 páginas.

[8] ABNT NBR 14070:2005 – Alumínio e suas ligas – Métodos de análises químicas. ICS 73:060.40; 77.120.10. Segunda Edição. 78 páginas.

[9] ABNT NBR NM ISO 6507-1:2019 – Materiais metálicos – Ensaio de dureza Vickers – Parte 1: Método de Ensaio. Primeira Edição. 30 páginas.

[10] ABNT NBR NM ISO 6506-1:2019 – Materiais metálicos – Ensaio de dureza Brinell – Parte 1: Método de Ensaio. Primeira Edição. 16 páginas.

[11] ISO 20482:2013 – Metallic materials – Sheet and strip – Erichsen cupping test. ICS: 77.040.10. Edition 2. Number os pages: 7.

[12] SANTOS, Aélcio de Jesus Monteiro dos; PRAZERES, Emerson Rodrigues; BARBOSA, Amanda Lucena de Medeiros. Influência da Anisotropia sobre o Efeito de Portevin-Le Chatelier nas Chapas AA5182. Ponta Grossa – PR: Editora Atena, 2023. Fazer imagens das fraturas dos corpos de prova (medir as cavidades: anisotropia?). Dizer os tipos de fases.

[13] OTOMAR, Heber Pires. “Estudo Comparativo da Estampabilidade da Liga de Alumínio AA1050 Partindo de Placas Obtidas por Vazamento Direto e Bobinas Obtidas por Vazamento Contínuo.” 2010. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. São Paulo – SP. 151 p.

[14] CAVALCANTE, Felipe Fernandes. “Comportamento Mecânico e Tenacidade à Fratura de Ligas de Alumínio 2024 e 7075 Submetidas a Diferentes Tempos de Envelhecimento.” 2016. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

[15] ASM. Aluminum 1200. 2025. Disponível em: <http://www.ASMmatweb.com>. Acesso em: 12 ago. 2025.

[16] BORGES, Doris Feijó Leão. “Processamento e Caracterização de Aluminetos de Ferro Obtidos a Partir de Matéria-prima Reciclada.” 2010. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais – São Paulo – SP. 151 p.

[17] American Society for Testing and Materials. ASTM E3 – 11 (Reapproved 2017). Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens. United States. 2017.

[18] ABNT NBR ISO 148-1:2021 – Materiais metálicos – Ensaio de impacto por pêndulo Charpy – Parte1: Método de ensaio. Segunda Edição. 30 páginas.

[19] GOLDSTEIN, J., et al. Scannig Electron Microscopy and X-ray Microanalysis. 3th Edition, Kluver Academic/ Plenum Publishers, NY, 2003. ISBN 0-306-47292-9.

[20] MANNHEIMER, W. A., Microscopia dos Materiais – Uma Introdução. Sociedade Brasileira de Microscopia e Microanálise. UFRJ – 2002.

[21] ABNT NBR 16282:2014 – Folhas e chapas de aço de baixo carbono – Determinação da anisotropia plástica e do expoente de encruamento – Método de ensaio. Primeira Edição. 7 páginas.

44º SENAFOR

28ª Conferência Internacional de Forjamento - Brasil
14ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas / 11º Congresso do BrDDRG
14ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis
3ª Conferência Internacional de Inovação em Materiais e Manufatura
Porto Alegre, RS, dias 1, 2 e 3 de outubro de 2025
www.senafor.com

ANÁLISE DOS COEFICIENTES DE ANISOTROPIA DE CHAPAS PLANAS DE ALUMÍNIO 1200-H14 SUBMETIDAS A RECOZIMENTO PARCIAL E ENSAIADAS APÓS RESFRIAMENTO A TEMPERATURA SUBZERO

Daniel Angelo Zattera Milesi [(1)]
Gaston Henrique Rossa [(2)]
Júlio de Lima Palhano [(3)]

ABSTRACT

This work analyzed the experimental results of tests to determine the anisotropy coefficients under a specific cold treatment condition involving variations in temperature parameters. Flat sheets of 1200-H14 series aluminum with a thickness of 3.00 mm were subjected to partial annealing at 280 °C for 50 min to work harden the aluminum, in order to obtain a more homogeneous microstructure (avoiding large precipitates). After annealing, a cooling procedure was carried out to a temperature of -25 °C for 10 min. The results demonstrated that the samples subjected to this procedure before the tests achieved an increase in plastic anisotropy (index 'r') and in the work hardening exponent ('n'), in addition to a 31% increase in elongation in the rolling direction. It was also found that the mechanical properties of tensile strength and conventional yield strength decreased, in smaller proportions, in relation to the same quality of Aluminum only subjected to medium hardening (H14).

Keywords — Anisotropy coefficients and work hardening exponent, yield curves, aluminum alloys.

(1) Mestre em Métodos de Fabricação, Engenheiro Mecânico, Responsável técnico do LAMEC – Laboratório de Ensaios Mecânicos da Universidade de Caxias do Sul – Caxias do Sul-RS e TechnNOVA, dazmiles@ucs.br
(2) Engenheiro Mecânico, Analista de Laboratório do LAMEC – Laboratório de Ensaios Mecânicos da Universidade de Caxias do Sul – Caxias do Sul-RS, ghrossa@ucs.br
(3) Graduando de Engenharia, Técnico de Laboratório do LAMEC – Laboratório de Ensaios Mecânicos da Universidade de Caxias do Sul – Caxias do Sul-RS, jlpalhano1@ucs.br

1. INTRODUÇÃO

Em diversos segmentos da indústria manufatureira é de fundamental importância mitigar todas as propriedades mecânicas dos materiais utilizados em componentes primários e secundários para correta validação do projeto, de modo a se obter o máximo de performance destas matérias-primas nos quesitos de resistência mecânica, conformabilidade e qualidade superficial. Com isso a segurança e confiabilidade no projeto se tornam evidentes. Questões como repetibilidade nos processos industriais de manufatura (principalmente na conformação de chapas) e efeitos provenientes destes procedimentos, como fissuras e furos de encolhimento, microtrincas, delaminação, porosidade, orelhamento, inclusões, devem ser minimizados e se possível eliminados. Este trabalho teve por objetivo analisar os coeficientes de anisotropia do material Alumínio 1200-H14 (UNS A91200) antes e após o encruamento médio a frio seguido de resfriamento a temperatura de - 25 °C como alternativa para melhoria no processo de conformação da chapa.

2. MÉTODOS

O método utilizado nesta pesquisa foi baseado na realização de ensaios mecânicos normalizados [1]-[2]-[3]-[4]-[5]-[6]-[7]-[8]-[9]-[10]-[11]-[17]-[18]-[21] com três critérios principais para validação dos resultados:

i. Caracterização dos materiais (antes e após o tratamento térmico supracitado na introdução);

ii. Determinação da anisotropia plástica e do expoente de encruamento (antes e após o tratamento térmico supracitado na introdução) [12];

iii. Estudo comparativo dos resultados obtidos em i e ii (antes e após o tratamento térmico supracitado na introdução) e as devidas correlações com o estado da arte dentro da Engenharia Mecânica e Metalúrgica;

O item i forneceu as informações básicas para que o ponto de partida da pesquisa atendesse as normas de interesse, que neste caso diz respeito a classe de material Alumínio 1200-H14 (UNS A91200) [15]. Esse material foi adquirido de fornecedor nacional e com certificado de qualidade sobre as propriedades mecânicas e químicas [1]-[15].

O item ii é o estado da arte da pesquisa pois é a análise principal para coleta de dados pertinentes a hipótese de que o referido tratamento térmico é uma alternativa para melhoria nos índices de anisotropia do material, de modo que o material se torne mais isotrópico quanto for possível, mesmo o Alumínio pertencendo a uma classe com 99 % de pureza [12].

O item iii é o trabalho de comparação e correlação direta dos resultados antes e depois do encruamento médio seguido de resfriamento a temperatura subzero [12]-[14].

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Caracterização do Material

O material escolhido para esta pesquisa foi o Alumínio da série 1200-H14 conhecido como uma série de Alumínio puro (> 99 % Al). A chapa apresenta as características conforme Tabela 1 e Tabela 2 e foi adquirida no mercado nacional. A análise de composição química foi realizada por espectroscopia de emissão ótica por descarga luminescente (GD-OES) usando padrão primário. Os dados das tabelas

comparam as informações da norma do material com as condições conforme recebido (H14) e pós-tratamento de recozimento médio (a 280 °C por 50 min) com posterior resfriamento a – 25 por 10 min.

Tabela 1 – Composição química (% de cada elemento) da norma [15] versus análise realizada [3]-[8].

Designa-ção	Densida-de (g/cm³)	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
1200-Norma	2,71	1,00 Si + Fe		0,05	0,05	-	-	0,10	0,05	99,00
1200-Conforme recebido **	2,71	0,075	0,429	0,019	0,034	0,0002	0,0022	<0,001	0,015	99,397

* Utilizado método de Alumínio puro para esta análise. Média (x) de três medições;
** Na condição conforme recebido.

Tabela 2 – Propriedades mecânicas da norma versus análises realizadas [5].

Designação	Têmpera	Espessura nominal "e" (mm)	Limite de resistência a tração (MPa)	Limite convencio-nal de escoamento (MPa)	Alongamen-to mínimo (%)	Módulo de Elasticidade (GPa)
					50 mm	
1200-Norma	H14	1,20 * e * 6,30	110 (mín) – 145 (máx)	95 (mín)	5	68
1200-Conforme recebido **	H14	3,00	125	118	9	72
1200-Processado ***	H14 ***	3,00	115	102	14	72

* Tréplica de tração em corpo de prova com lo = 50 mm; Ponto da curva correspondente ao escoamento convencional = 0,2 %; U (dimensional da espessura) = ± 0,01 mm; U (LRT e LE) = ± 3 MPa; U (alongamento) = ± 0,2 mm;
** Na condição conforme recebido;
*** Na condição após encruamento a frio (processada).

Micrografias

A análise microscópica da amostra na condição somente encruada com dureza entre limites – têmpera H14 – apresentou uma microestrutura constituída por precipitados dispersos e com diferentes colorações e formas (Figura 1 – letras A, B, C, D, E e F). Esses precipitados tiveram uma tendência de acompanhar a direção de laminação indicada nas imagens pela seta branca (L).

Na condição pós-tratamento notou-se uma desfragmentação desses precipitados de forma a apresentar um padrão mais disperso dos mesmos na matriz de Alumínio. Os precipitados continuaram seguindo uma tendência de direção conforme sentido de laminação. Em sua maioria, trata-se de aglomerações de Al + Fe, tradicionalmente conhecidos como intermetálicos de aluminetos de Ferro Fe3Al e FeAl, cujo modo de falha é respectivamente clivagem e CG (contorno de grão: fratura intergranular) [16].

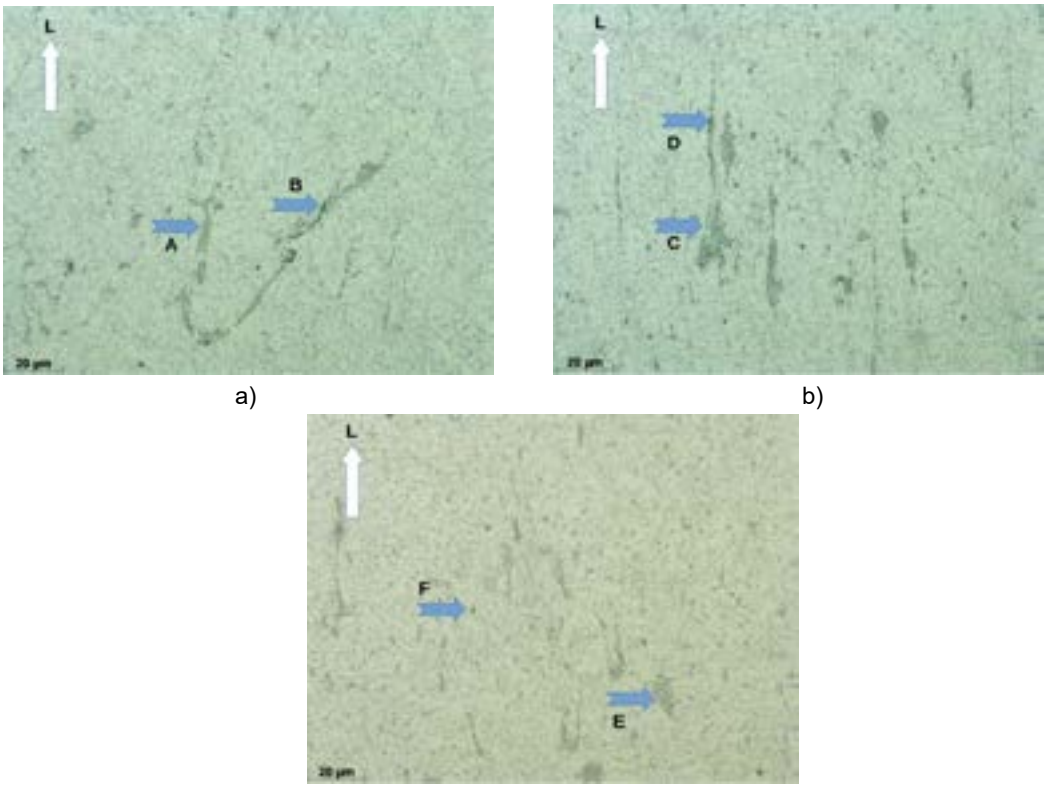


Figura 1 – Micrografia do Al 1200-H14 evidenciando precipitados (setas azuis) de diversos formatos, dispersos e alinhados com a direção de laminação (seta branca) da chapa na condição de recebimento (500x-MO, polimento manual com ataque Keller [17]): a) Planar; b) Longitudinal; c) Transversal.

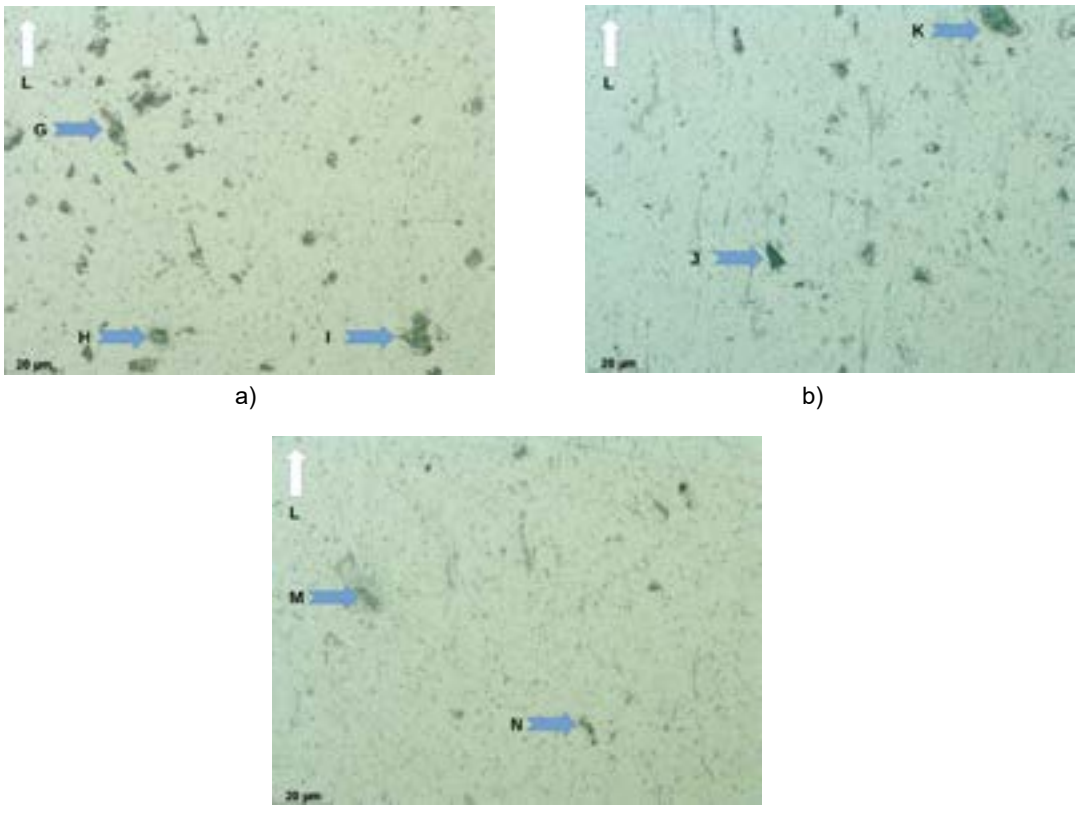


Figura 2 – Micrografia do Al 1200-H14 evidenciando precipitados (setas azuis) de diversos formatos, dispersos e alinhados com a direção de laminação (seta branca) da chapa na condição após tratamento de recozimento parcial e resfriamento subzero (500x-MO, polimento manual com ataque Keller [17]): a) Planar; b) Longitudinal; c) Transversal.

Dureza e tenacidade ao impacto (Charpy V)

A microdureza * no sentido longitudinal da amostra na condição conforme recebida forneceu valores dentro da faixa informada pela série 1200-H14, que corresponde a 35 HB (U = ± 2 HB, onde k = 2) [9]-[10].

O ensaio de impacto pelo método Charpy com entalhe em 'V' [18] demonstrou que a absorção de energia aumentou após o recozimento médio e posterior resfriamento. Isso pode ser atribuído a redistribuição dos precipitados na matriz.

Tabela 3 – Dureza e tenacidade ao impacto da norma versus análises realizadas.

Designação	Dureza (HB)	Absorção de energia (em J na temperatura ambiente em °C)	Absorção de energia (em J na temperatura sub zero de - 25 °C)
1200 - Norma	37	na****	na****
1200 – Conforme recebido **	35	5,9	5,5
1200 – Processado ***	32	7,1	7,8

* Foi realizado o ensaio de microdureza Vickers HV 0,1 (em função de ser uma chapa plana de 3,00 mm de espessura) e após foi convertido para a escala HB; U = ± 3% para dureza Vickers 0,1; U = ± 0,25 J para absorção de energia.
** Na condição conforme recebido;
*** Na condição após encruamento a frio (processada);
**** Sem informação de norma sobre essa propriedade do material.

Embutimento Erichsen

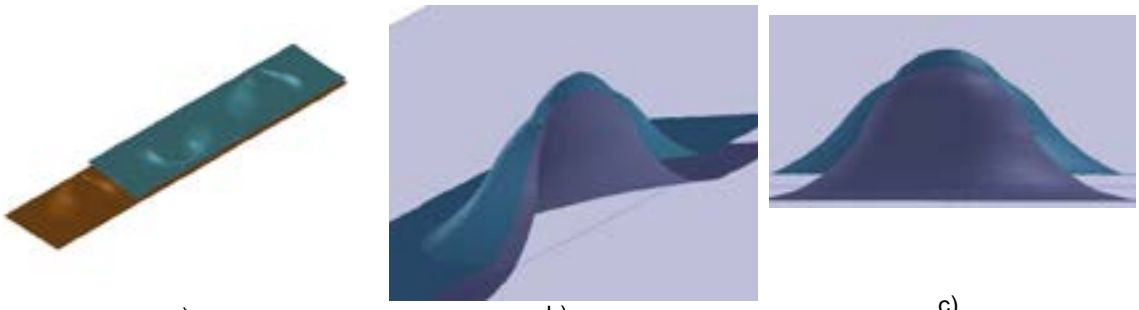
Para entender as diferenças na capacidade de deformação do material foram realizados ensaios de embutimento Erichsen [11]. O método de comparação entre as duas condições do material – conforme recebido e após resfriamento subzero – contribuiu para checar se houve mudanças significativas na questão do estiramento do material.

Tabela 4 – Valores de profundidade para embutimento Erichsen (média de 05 embutimentos para cada condição).

Designação	Valor de indentação IE (mm)
1200 - Norma	na***
1200 – Conforme recebido *	14,86
1200 – Processado **	14,93

* Na condição conforme recebido;
** Na condição após encruamento a frio (processada);
*** Sem informação de norma sobre essa propriedade do material.

Figura 3 – Foto digital de um dos embutimentos destacando o aspecto da trinca na parte superior e o perfil característico da indentação: formação de um orbicular na parte superior (sem fator de escala e em luz natural).



a) b) c)

Figura 4 – a) Escâner da amostra de chapa com embutimentos; b-c) Detalhe para o perfil de deformação na espessura da chapa (não constante). Redução de aprox. 1,01 mm na espessura na parte mais profunda do estampo.

Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) com Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS)

De acordo com os resultados das micrografias de elétrons retro espalhados e da microanálise qualitativa de raios-X por dispersão em energia, pode-se, de forma sucinta, relatar que a amostra de Alumínio 1200-HT14 na referida condição (conforme recebida) não apresenta uma quantidade expressiva de inclusões, nas regiões planar e longitudinal. Não foram identificadas inclusões estruturais, somente na região transversal foi identificada uma inclusão [16]-[19]-[20].

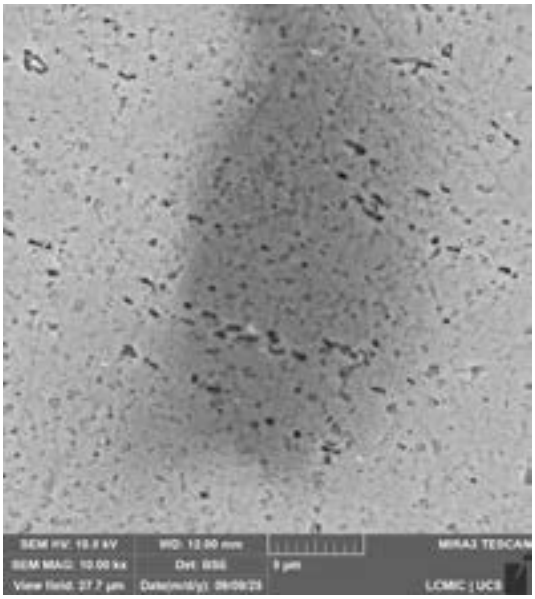
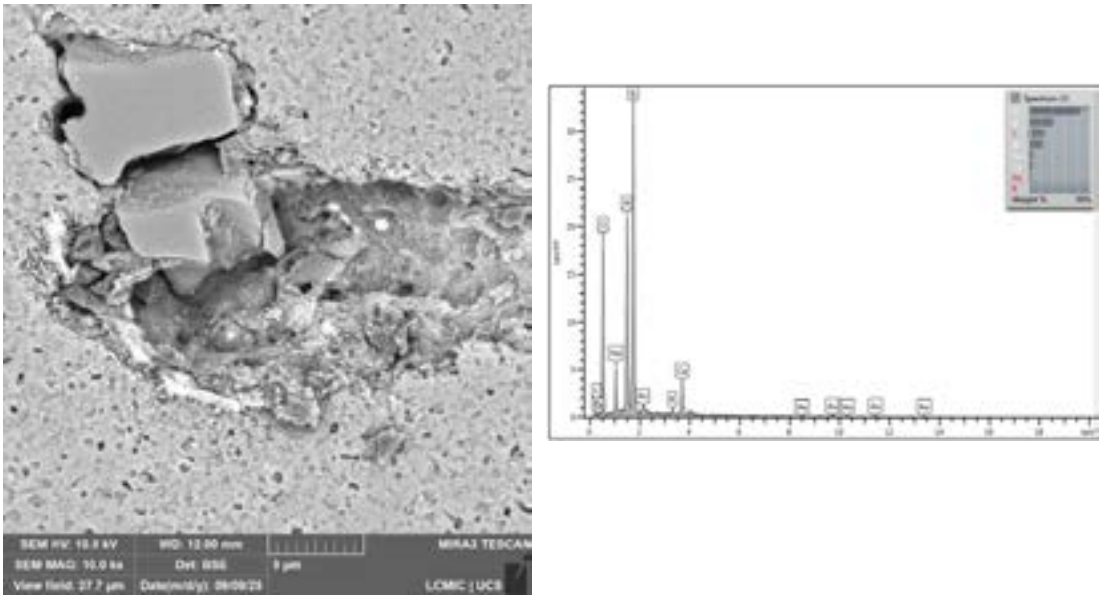


Figura 5 – Micrografia (BSE) da superfície da amostra na condição conforme recebido. Visualiza-se estruturas submicrométricas com manchas dispersas (MEV).

A microanálise qualitativa de raios-X por dispersão em energia (EDS) mostra que nas regiões planar e longitudinal tem-se majoritariamente Alumínio (Al) e apenas traços de Carbono, Ferro e Oxigênio (C, Fe, O). Na região transversal foi identificada uma inclusão de aluminossilicato NaAlSi3O8 contendo os elementos Alumínio, Cálcio, Carbono, Potássio, Sódio, Oxigênio e Silício (Al, Ca, C, K, Na, O e Si) assim como os elementos Cromo, Ferro e Níquel (Cr, Fe e Ni) [16]-[19]-[20].



a) b)

Figura 6 – Micrografia (BSE) da superfície da amostra na condição conforme recebido: a) Inclusão facetada de aluminossilicato do tipo NaAlSi3O8; b) Espectros de EDS referentes a ponto marcado na área da inclusão (grão maior).

Índices de anisotropia e encruamento

De forma geral, o Alumínio 1200-H14 é totalmente anisotrópico devido ao seu alto teor de Alumínio (99 %). O fato de não ter elementos de liga ocasiona esse problema. Mesmo assim, a anisotropia plástica e expoente de encruamento tiveram seus valores alterados após o tratamento de recozimento médio seguido de resfriamento subzero. Enquanto as propriedades mecânicas de limite de escoamento e limite de tração reduziram seus valores em uma proporção determinada, o alongamento no sentido de laminação do material aumentou substancialmente, mesmo que ainda sem bons resultados para aplicação prática [5]-[7]-[21].

Tabela 5 – Resultados dos ensaios de tração para o material na condição conforme recebido.

Designação	**Área (mm²)**	**Limite de escoamento**			**Limite de resistência à tração**			**Alongamento**			
		(MPa)	**U (MPa)**	**k**	**(MPa)**	**U (MPa)**	**k**	**Lo (mm)**	**(%)**	**U (mm)**	k
00°	37,8	108	± 1,08	2,00	118	± 1,18	2,00	50	16	± 0,016	2,00
45°	37,9	114	± 1,14	2,00	121	± 1,21	2,00	50	12	± 0,012	2,00
90°	37,5	114	± 1,14	2,00	121	± 1,21	2,00	50	12	± 0,012	2,00

Tabela 6 – Resultados dos ensaios de tração para o material na condição após resfriamento subzero.

Al 1200-H14 após resfriamento	**Área (mm²)**	**Limite de escoamento**			**Limite de resistência à tração**			**Alongamento**			
		(MPa)	**U (MPa)**	**k**	**(MPa)**	**U (MPa)**	**k**	**Lo (mm)**	**(%)**	**U (mm)**	k
00°	37,9	99	± 0,99	2,00	111	± 1,11	2,00	50	21	± 0,021	2,00
45°	37,5	102	± 1,02	2,00	110	± 1,10	2,00	50	14	± 0,014	2,00
90°	37,3	103	± 1,03	2,00	111	± 1,11	2,00	50	12	± 0,012	2,00

Tabela 7 – Resultados dos ensaios de anisotropia para o material na condição conforme recebido.

Al 1200-H14 após resfria-mento subzero	Compri-mento inicial (mm) "Lo"	Deformação aplicada (%) "Lf"	Deformação na espessura "Ɛt"	Deformação na largura "Ɛb"	Anisotropia "r"	"Δr"	Índice de Encrua-mento "n"
00°	50	1,8	0,012	0,001	0,09	-0,25	0,027
45°	50	1,8	0,012	0,004	0,29	0,10	0,013
90°	50	1,8	0,012	0,005	0,45	0,08	0,018
				Média (m):	0,28	-0,03	0,019

Tabela 8 – Resultados dos ensaios de anisotropia para o material na condição após resfriamento subzero.

Al 1200-H14 após resfria-mento subzero	Compri-mento inicial (mm) "Lo"	Deformação aplicada (%) "Lf"	Deformação na espessura "Ɛt"	Deformação na largura "Ɛb"	Anisotropia "r"	"Δr"	Índice de Encrua-mento "n"
00°	50	1,8	0,013	0,004	0,31	0,07	0,042
45°	50	1,8	0,012	0,004	0,31	0,21	0,032
90°	50	1,8	0,010	0,007	0,63	0,21	0,032
				Média (m):	0,39	0,16	0,026

4. CONCLUSÕES

Embora o motivo maior desta pesquisa seja a análise dos índices de anisotropia e encruamento do Alumínio 1200-H14 em diferentes condições, os principais resultados obtidos dizem respeito ao aumento na propriedade mecânica de alongamento do material que foram determinados pelas curvas de escoamento. Esse aumento, na condição pós-tratamento teve um valor substancial de 31 % no sentido de laminação da chapa (ângulo de 0 °). Para ângulo de 45 °, o valor de incremento na mesma propriedade foi de 16 %. No sentido de 90 °, evidenciou-se que os valores ficaram iguais. De maneira geral, o índice de anisotropia 'r' teve um aumento de 39 % em relação a condição 'conforme recebido'. Porém, mesmo com acréscimo no 'r', ainda pode-se afirmar que o material é totalmente isotrópico. Da mesma forma, o expoente de encruamento do Al 1400-H14 teve aumento de 36 %, que não chega a ser substancial esse tipo de material. O aumento no alongamento e a consequente diminuição do limite de escoamento e de tração explica a formação de orbicular durante o ensaio de embutimento Erichsen. Logo, é plausível afirmar que o pós-tratamento aplicado seguido de resfriamento a temperatura subzero não foi satisfatório para melhoria do processo de estampagem do material ou ainda, foi pouco significativo.

REFERENCES

[1] Coletânea de Normas Técnicas de Alumínio e suas Ligas. São Paulo: ABAL – Associação Brasileira do Alumínio, 2008. 758 p.

[2] ABNT NBR 6599:2007 – Alumínio e suas ligas – Processos e produtos – Terminologia. ICS 01.040.01; 77:120.10. – Segunda Edição. 10 páginas.

[3] ABNT NBR 6834:2006 – Alumínio e suas ligas – Classificação da composição química. ICS 77:120.10. Segunda Edição. 25 páginas.

[4] ABNT NBR 6835:2000 – Alumínio e suas ligas – Classificação das têmperas. 6 páginas.

[5] ABNT NBR 7549:2001 – Alumínio e suas ligas – Ensaio de tração dos produtos dúcteis e fundidos. 17 páginas.

[6] ABNT NBR 7556:2006 – Alumínio e suas ligas – Chapas – Requisitos. ICS 77:120.10. Segunda Edição.14 páginas.

[7] ABNT NBR 7823:2007 – Alumínio e suas ligas – Chapas – Propriedades mecânicas. ICS 77:150.10. Segunda Edição. 47 páginas.

[8] ABNT NBR 14070:2005 – Alumínio e suas ligas – Métodos de análises químicas. ICS 73:060.40; 77.120.10. Segunda Edição. 78 páginas.

[9] ABNT NBR NM ISO 6507-1:2019 – Materiais metálicos – Ensaio de dureza Vickers – Parte 1: Método de Ensaio. Primeira Edição. 30 páginas.

[10] ABNT NBR NM ISO 6506-1:2019 – Materiais metálicos – Ensaio de dureza Brinell – Parte 1: Método de Ensaio. Primeira Edição. 16 páginas.

[11] ISO 20482:2013 – Metallic materials – Sheet and strip – Erichsen cupping test. ICS: 77.040.10. Edition 2. Number os pages: 7.

[12] SANTOS, Aélcio de Jesus Monteiro dos; PRAZERES, Emerson Rodrigues; BARBOSA, Amanda Lucena de Medeiros. Influência da Anisotropia sobre o Efeito de Portevin-Le Chatelier nas Chapas AA5182. Ponta Grossa – PR: Editora Atena, 2023. Fazer imagens das fraturas dos corpos de prova (medir as cavidades: anisotropia?). Dizer os tipos de fases.

[13] OTOMAR, Heber Pires. “Estudo Comparativo da Estampabilidade da Liga de Alumínio AA1050 Partindo de Placas Obtidas por Vazamento Direto e Bobinas Obtidas por Vazamento Contínuo.” 2010. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. São Paulo – SP. 151 p.

[14] CAVALCANTE, Felipe Fernandes. “Comportamento Mecânico e Tenacidade à Fratura de Ligas de Alumínio 2024 e 7075 Submetidas a Diferentes Tempos de Envelhecimento.” 2016. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

[15] ASM. Aluminum 1200. 2025. Disponível em: <http://www.ASMmatweb.com>. Acesso em: 12 ago. 2025.

[16] BORGES, Doris Feijó Leão. “Processamento e Caracterização de Aluminetos de Ferro Obtidos a Partir de Matéria-prima Reciclada.” 2010. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais – São Paulo – SP. 151 p.

[17] American Society for Testing and Materials. ASTM E3 – 11 (Reapproved 2017). Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens. United States. 2017.

[18] ABNT NBR ISO 148-1:2021 – Materiais metálicos – Ensaio de impacto por pêndulo Charpy – Parte1: Método de ensaio. Segunda Edição. 30 páginas.

[19] GOLDSTEIN, J., et al. Scannig Electron Microscopy and X-ray Microanalysis. 3th Edition, Kluver Academic/ Plenum Publishers, NY, 2003. ISBN 0-306-47292-9.

[20] MANNHEIMER, W. A., Microscopia dos Materiais – Uma Introdução. Sociedade Brasileira de Microscopia e Microanálise. UFRJ – 2002.

[21] ABNT NBR 16282:2014 – Folhas e chapas de aço de baixo carbono – Determinação da anisotropia plástica e do expoente de encruamento – Método de ensaio. Primeira Edição. 7 páginas.

44º SENAFOR

28ª Conferência Internacional de Forjamento - Brasil
14ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas / 11º Congresso do BrDDRG
14ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis
3ª Conferência Internacional de Inovação em Materiais e Manufatura
Porto Alegre, RS, dias 1, 2 e 3 de outubro de 2025
www.senafor.com

INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL APLICADA NA MODELAGEM DO COMPORTAMENTO DE DEFORMAÇÃO A QUENTE DE CHAPAS METÁLICAS

André Rosiak [1]
Rafael Pandolfo da Rocha [2]
Matheus Henrique Riffel [3]
Lirio Schaeffer [4]

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo modelar o comportamento de deformação plástica a quente da liga de alumínio AA 5052-H32 utilizando abordagens tradicionais e baseadas em Inteligência Artificial (IA). Ensaios de tração a quente foram conduzidos no simulador termomecânico Gleeble® 540 em diferentes temperaturas (100–450 °C) e velocidades de deformação (0,01 e 1 s^{-1}), possibilitando a obtenção das curvas de escoamento do material. Inicialmente, os dados experimentais foram ajustados por meio da equação constitutiva de Hensel-Spittel, amplamente utilizada para simular processos de conformação a quente. Em seguida, modelos preditivos baseados em IA foram desenvolvidos, utilizando Redes Neurais Artificiais (RNA) e o algoritmo eXtreme Gradient Boosting (XGBoost). A RNA foi otimizada com diferentes arquiteturas e funções de ativação, alcançando erro absoluto médio (MAE) de 3,61 MPa e erro quadrático médio (MSE) de 19,09 MPa^2. Já o modelo XGBoost apresentou desempenho superior, com MAE de 0,74 MPa, MSE de 2,46 MPa^2 e coeficiente de determinação (R^2) de 0,9988. Os resultados indicam que ambas as abordagens são eficazes na previsão do escoamento a quente da liga AA 5052-H32, sendo o XGBoost particularmente eficiente na modelagem de relações não lineares complexas entre deformação, velocidade de deformação e temperatura.

Palavras-chave: Deformação a quente; Ligas de alumínio; Inteligência Artificial.

1. INTRODUÇÃO

Os avanços na indústria da mobilidade têm se concentrado em soluções inovadoras e economicamente viáveis, visando ampliar a eficiência energética dos veículos. Paralelamente, as exigências relacionadas ao desempenho em impactos têm se tornado cada vez mais rigorosas. Como resultado, os veículos estão mais seguros do que nunca, impulsionando o uso de materiais leves e de alta resistência, criteriosamente selecionados para atender a esses requisitos.

As ligas de aço ainda predominam no setor automotivo devido à sua excelente relação custo-benefício. No entanto, as ligas de alumínio vêm ganhando destaque como alternativa promissora aos materiais convencionais, desempenhando um papel relevante na redução de peso dos componentes veiculares [1]. Essas ligas se destacam por sua elevada resistência mecânica, boa capacidade de absorção de energia, alta reciclabilidade e baixa densidade, além de apresentarem boa resistência à corrosão [2]. Comparadas ao aço, possibilitam uma redução de peso de até 50% [3].

Os avanços na indústria da mobilidade têm se concentrado em soluções inovadoras e economicamente viáveis, visando ampliar a eficiência energética dos veículos. Paralelamente, as exigências relacionadas ao desempenho em impactos têm se tornado cada vez mais rigorosas. Como resultado, os veículos estão mais seguros do que nunca, impulsionando o uso de materiais leves e de alta resistência, criteriosamente selecionados para atender a esses requisitos.

As ligas de aço ainda predominam no setor automotivo devido à sua excelente relação custo-benefício. No entanto, as ligas de alumínio vêm ganhando destaque como alternativa promissora aos materiais convencionais, desempenhando um papel relevante na redução de peso dos componentes veiculares [1]. Essas ligas se destacam por sua elevada resistência mecânica, boa capacidade de absorção de energia, alta reciclabilidade e baixa densidade, além de apresentarem boa resistência à corrosão [2]. Comparadas ao aço, possibilitam uma redução de peso de até 50% [3].

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A Tabela 1 lista a composição química da liga de alumínio 5052-H32 com 1 mm de espessura utilizada neste trabalho. A composição está dentro da faixa nominal encontrada na literatura [8].

Tabela 1 Composição química da liga de alumínio 5052-H32 com 1 mm de espessura.

Al	Mg	Si	Fe	Cr	Outros
96,9	2,20	0,18	0,31	0,15	0,26

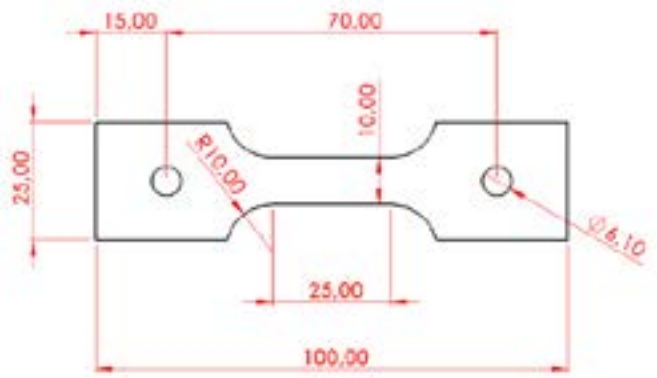


Figura 1 Detalhamento dos corpos de prova de tração a quente.

O material foi submetido a ensaios de tração a quente conduzidos no simulador termomecânico Gleeble® 540. A Figura 1 mostra o detalhamento do corpo de prova utilizado.

Durante os testes, as amostras foram aquecidas à temperatura alvo com taxa controlada, mantidas em patamar térmico por 30 segundos para homogeneização e, em seguida, deformadas até a fratura. A Tabela 2 lista as condições termomecânicas utilizadas nos testes.

Tabela 2 Parâmetros termomecânicos dos ensaios de tração a quente.

Condições	Temperatura [°C]	Velocidade de deformação [1/s]
1	100	0,01
2	100	1
3	200	0,01
4	200	1
5	300	0,01
6	300	1
7	450	0,01
8	450	1

2.1 Modelo de Hensel-Spittel

Uma abordagem amplamente utilizada na modelagem e previsão da tensão de escoamento na deformação a quente foi proposta por Hensel e Spittel [9-11]:

$$k_f = C.e^{m_1 T}.\varphi^{m_2}.\dot{\varphi}^{m_3}.e^{\frac{m_4}{\varphi}}.(1+\varphi)^{m_5 T}.e^{m_7 \varphi}.\dot{\varphi}^{m_8 T}.T^{m_9} \quad \text{(Equação 1)}$$

Onde C, m_1 a m_9 são constantes do material e devem ser determinadas experimentalmente.

Este modelo é basicamente uma combinação do modelo clássico de lei de potência e dos modelos Hollomon e Swift com as constantes consideradas como funções da deformação e da temperatura [12].

O modelo constitutivo de Hensel-Spittel quantifica o efeito da deformação, temperatura e velocidade de deformação na tensão de escoamento, e pode apresentar o comportamento de deformação a quente com alta precisão [13]. Além disso, a maioria dos softwares comerciais de elementos finitos integra o Modelo Constitutivo de Hensel-Spittel, e a identificação dos parâmetros do modelo constitutivo pode fornecer dados de entrada para a simulação de elementos finitos.

A metodologia adotada para o ajuste do modelo constitutivo baseou-se na linearização da equação de Hensel-Spittel por meio da aplicação do logaritmo natural, permitindo a determinação sequencial dos parâmetros do modelo. A partir de simplificações com variáveis constantes, diferentes formas da equação foram obtidas para isolar os coeficientes associados à velocidade de deformação, temperatura e deformação. Com isso, foram realizados ajustes lineares entre os dados experimentais e as variáveis transformadas, possibilitando a extração dos parâmetros por meio das inclinações e interceptações médias obtidas em diferentes condições.

2.2 Modelamento utilizando Inteligência Artificial

Modelos baseados em Inteligência Artificial (IA) começaram a ser aplicados em processos de conformação mecânica principalmente a partir da década de 1990. A

introdução da IA visou superar algumas limitações intrínsecas aos métodos tradicionais, como a dificuldade em representar com precisão fenômenos complexos relacionados ao comportamento dos materiais, além da necessidade de otimização de processos com múltiplos parâmetros em tempo real. Desde então, os modelos de IA têm se mostrado altamente eficazes ao lidar com a complexidade inerente aos processos de conformação, oferecendo abordagens mais flexíveis para a modelagem de relações não lineares e a previsão de comportamentos mecânicos e falhas. A expansão de seu uso foi impulsionada pelo aumento da capacidade computacional e pela maior disponibilidade de dados experimentais e de simulações. Dessa forma, a IA consolidou-se como uma ferramenta poderosa para aprimorar a eficiência, a precisão e o controle de processos na área de conformação mecânica [14].

Devido a essas características, diferentes abordagens baseadas em Inteligência Artificial (IA) têm sido aplicadas à predição de curvas de escoamento de metais [15–21]. Diferentemente de modelos fenomenológicos, como o de Hensel-Spittel, o desenvolvimento de modelos de IA não requer a definição prévia de relações explícitas entre as variáveis de entrada e saída, o que confere maior flexibilidade e simplicidade à sua aplicação. Trata-se, contudo, de uma abordagem na qual as relações físicas entre as variáveis não são incorporadas diretamente ao modelo [13].

Neste trabalho, duas abordagens baseadas em Inteligência Artificial (IA) foram investigadas: Redes Neurais Artificiais (RNA) e eXtreme Gradient Boosting (XGBoost). Os modelos foram treinados com os dados obtidos experimentalmente a partir dos ensaios de tração da liga AA 5052, nos quais variaram-se os parâmetros de deformação, velocidade de deformação e temperatura, com o objetivo de prever com precisão a tensão de escoamento em diferentes condições de conformação.

A primeira etapa da metodologia consistiu no pré-processamento dos dados. As variáveis de entrada — deformação (φ), velocidade de deformação ($\dot{\varphi}$) e temperatura (T) — e a variável de saída — tensão de escoamento (σ_f) — foram organizadas em um conjunto de dados estruturado. Em seguida, foi aplicada a técnica de normalização Min-Max para escalar os dados entre 0 e 1, garantindo uma distribuição equilibrada entre as variáveis e favorecendo a estabilidade e a eficiência do processo de aprendizado das redes neurais.

Na abordagem com RNA, os dados foram divididos em conjuntos de treino e teste, mantendo-se uma fração de 20% para validação final do desempenho. A arquitetura da rede foi definida com base em um processo automatizado de otimização de hiperparâmetros estruturais, no qual diferentes combinações de camadas ocultas e funções de ativação foram sistematicamente avaliadas quanto ao desempenho preditivo. O modelo final foi treinado com o otimizador Adam e função de perda do tipo erro quadrático médio (MSE). Para evitar o sobreajuste (overfitting), foi empregado o recurso de early stopping, interrompendo o treinamento caso não houvesse melhora da perda de validação após 30 épocas consecutivas.

Durante o treinamento, a rede foi avaliada continuamente por meio de métricas como o erro absoluto médio (MAE) e o erro quadrático médio (MSE), tanto para os dados de treinamento quanto de validação. As curvas de aprendizado resultantes foram analisadas para confirmar a estabilidade do processo e a capacidade de generalização do modelo. Após o término do treinamento, a RNA foi testada com todo o conjunto de dados para geração das curvas de escoamento previstas e posterior comparação com os dados experimentais.

A metodologia aplicada ao XGBoost seguiu princípios semelhantes, com a diferença de que esta técnica não requer normalização das entradas e é

particularmente eficaz para conjuntos de dados tabulares. O modelo foi ajustado utilizando uma combinação de validação cruzada e otimização dos principais hiperparâmetros de controle, como profundidade das árvores, taxa de aprendizado e número de estimadores. Após o ajuste fino do modelo, os resultados previstos foram comparados com os experimentais, possibilitando a avaliação crítica do desempenho preditivo da abordagem em relação à RNA.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esse capítulo apresenta os resultados obtidos desde a caracterização do comportamento mecânico a quente da liga AA 5052-H32 até a sua modelagem por meio de técnicas avançadas de Inteligência Artificial.

3.1 Curvas de escoamento da liga AA 5052-H32

A Figura 2 apresenta as curvas de escoamento da liga AA 5052-H32 obtidas sob diferentes temperaturas e velocidades de deformação. Observa-se uma influência significativa da temperatura na resistência do material: com o aumento da temperatura de deformação, ocorre uma expressiva redução na tensão de escoamento, evidenciando o amolecimento térmico característico de materiais metálicos.

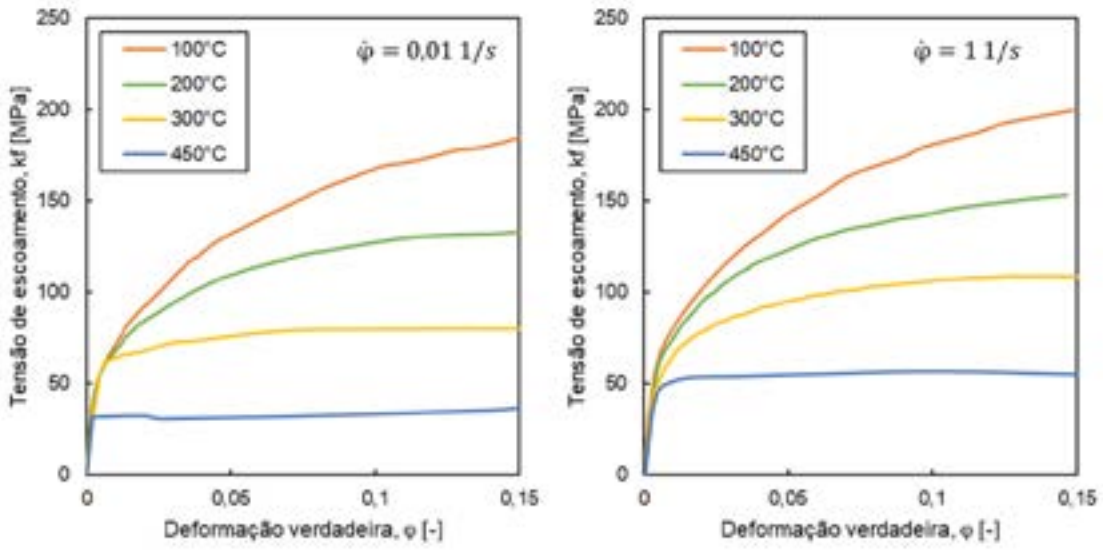


Figura 2 Curvas de escoamento da liga AA 5052-H32 obtidas sob diferentes temperaturas e velocidades de deformação.

O efeito da velocidade de deformação também é notável. Para todas as temperaturas analisadas, as tensões de escoamento são mais elevadas nas maiores velocidades, o que se deve à atuação limitada dos mecanismos de amolecimento, que requerem tempo para ocorrer. Em consequência, o encruamento é mais pronunciado em altas velocidades de deformação, resultando em maior resistência ao escoamento. Além disso, o formato das curvas varia conforme a condição térmica. A 100 °C, por exemplo, observa-se um aumento contínuo da tensão com a deformação, indicando forte influência do encruamento. Em temperaturas mais elevadas, como 300 °C, a elevação da tensão com a deformação é menos acentuada. Já a 450 °C, a curva exibe uma região plástica praticamente estável, com pouca variação adicional da tensão de escoamento, o que revela a atuação dominante dos mecanismos de amolecimento térmico. Esse comportamento também foi observado por [22] em condições semelhantes de deformação para a liga AA 5052.

3.2 Modelo de Hensel-Spittel

A Tabela 3 apresenta os parâmetros da equação de Hensel-Spittel obtidos a partir do ajuste aos dados experimentais, Já a Figura 3 compara as curvas de escoamento experimentais com aquelas previstas pelo modelo.

Tabela 3 Parâmetros de Hensel-Spittel para a liga AA 5052-H32.

C	m1	m2	m3	m4	m5	m7	m8	m9
1247,7	-8,443	0,872	0,030	0,002	-0,101	-2,129	-0,948	0,572

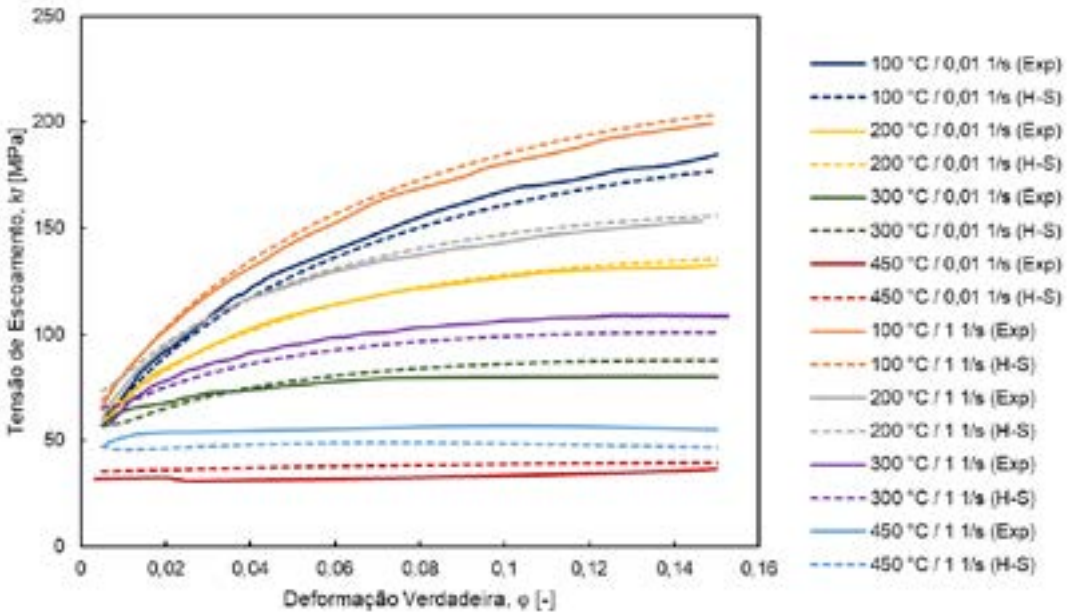


Figura 3 Comparação das curvas de escoamento da liga AA 5052-H32 experimentais e previstas pelo modelo de Hensel-Spittel,

De modo geral, observa-se um bom ajuste entre os dados modelados e os valores experimentais, conforme ilustrado na Figura 4, que apresenta a correlação entre os valores previstos e medidos da tensão de escoamento. Embora o modelo tenha alcançado um elevado coeficiente de determinação global (R^2 = 0,9847), indicando alta capacidade preditiva, nota-se uma variação no desempenho em função das condições de ensaio. Em temperaturas mais elevadas, especialmente a 450 °C, o modelo mostrou-se menos eficaz na representação do comportamento do material, sugerindo limitações na capacidade de capturar adequadamente os mecanismos de amolecimento térmico predominantes nessas condições.

A análise dos coeficientes permite algumas considerações relevantes sobre o comportamento do material. O parâmetro m1 negativo confirma a tendência esperada de redução da resistência ao escoamento com o aumento da temperatura, caracterizando o amolecimento térmico típico dos metais durante a conformação a quente, O valor positivo de m2 reflete o encruamento do material, evidenciado pelo aumento gradual da resistência com o incremento da deformação verdadeira.

A influência da velocidade de deformação, expressa por um valor de m3 = 0,0304, mostrou-se pequena, sugerindo que o material possui baixa sensibilidade à velocidade de deformação nas condições avaliadas. O termo exponencial m4/φ atua de forma mais significativa em baixas deformações, contribuindo para o crescimento inicial da resistência.

O parâmetro m5 negativo modula o termo (1+φ) e suaviza o efeito do encruamento, especialmente em altas temperaturas. Os termos m7 e m8, ambos negativos, exercem importante papel na descrição do amolecimento térmico e da recuperação dinâmica, especialmente em altas deformações e temperaturas elevadas.

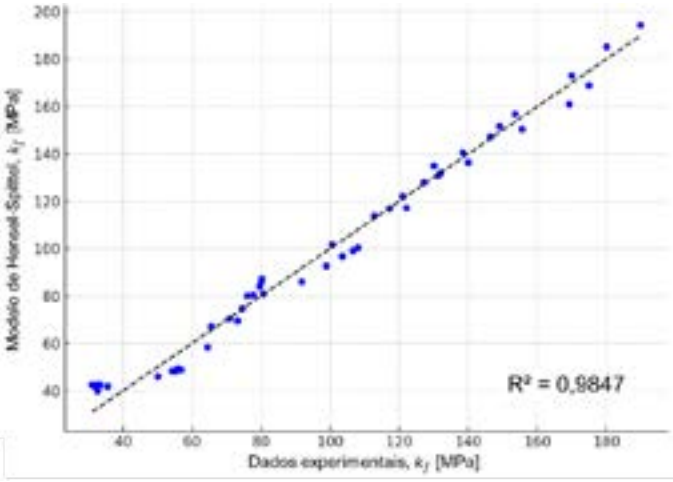


Figura 4 Comparação dos dados de tensão de escoamento da liga AA 5052-H32 experimentais e previstos pelo modelo de Hensel-Spittel,

O parâmetro m9 positivo atua compensando o efeito de redução exponencial de resistência imposto por m1, ajustando adequadamente a inclinação da curva de escoamento em função da temperatura.

3.3 Modelo de RNA

A escolha da arquitetura de uma Rede Neural Artificial (RNA) tem impacto direto no seu desempenho [23], especialmente em problemas com relações complexas e não lineares, como é o caso da previsão da tensão de escoamento da liga AA 5052-H32. Com o objetivo de identificar a arquitetura ideal com base nas variáveis deformação, velocidade de deformação e temperatura, foi implementado um algoritmo de busca automatizada por hiperparâmetros estruturais. A estratégia adotada consistiu em um processo exaustivo e sistemático, no qual diferentes combinações de camadas ocultas e funções de ativação foram avaliadas quanto ao desempenho preditivo.

Foram definidas manualmente diversas arquiteturas com estrutura piramidal, representando diferentes níveis de complexidade, A Tabela 4 apresenta as características dessas arquiteturas, Além disso, foram testadas três funções de ativação amplamente utilizadas em problemas de regressão: 'relu', 'tanh' e 'elu', O código executa um duplo laço: para cada arquitetura, todas as funções de ativação são combinadas e avaliadas.

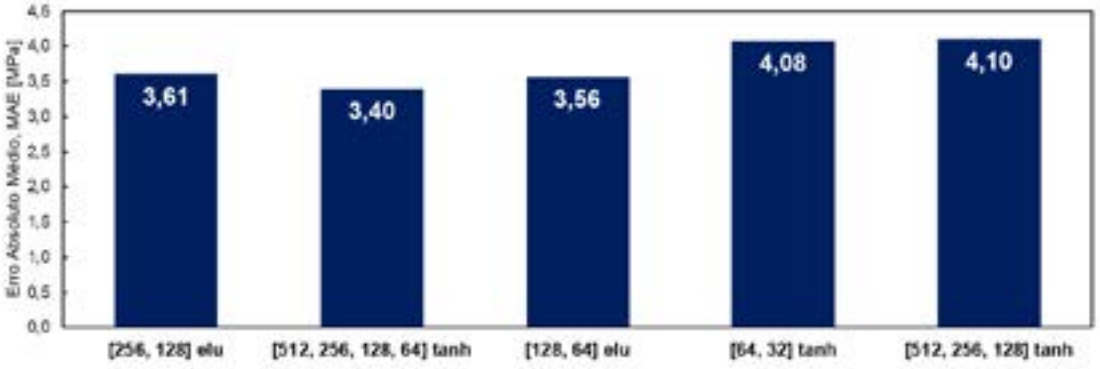
Para cada combinação, uma RNA do tipo Sequential é criada com as camadas ocultas e ativações definidas, O modelo é compilado utilizando o otimizador adam e a função de perda mse, O treinamento é realizado com validação interna (validation_split=0,2) e controle de overfitting por meio da técnica de EarlyStopping, com patience=30, A avaliação final de desempenho é feita no conjunto de teste, utilizando as métricas MAE (erro absoluto médio), MSE (erro quadrático médio) e R^2 (coeficiente de determinação).

Os resultados de todas as execuções são armazenados em uma lista de dicionários, convertida ao final em um DataFrame, que é ordenado com base no

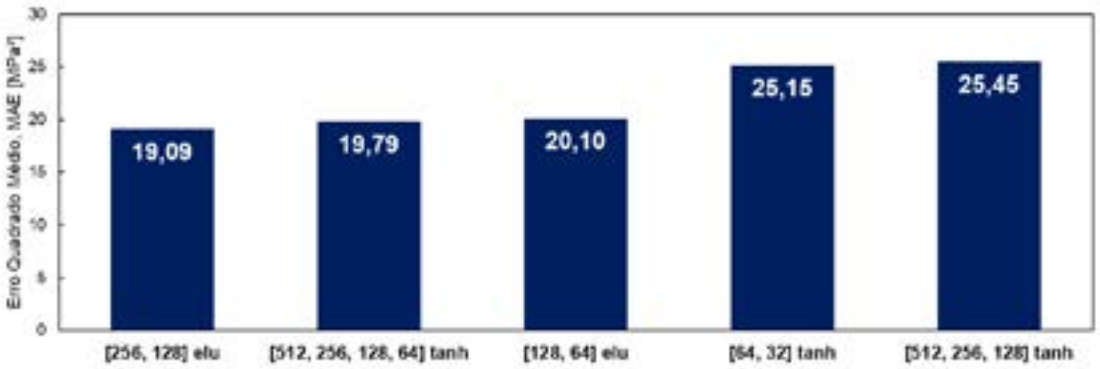
menor MSE, permitindo a identificação objetiva das arquiteturas mais precisas e robustas. As Figuras 5, 6 e 7 comparam os resultados de MAE, MSE e R^2 para os cinco modelos que apresentaram melhor desempenho.

Tabela 4 Características das arquiteturas de RNA avaliadas.

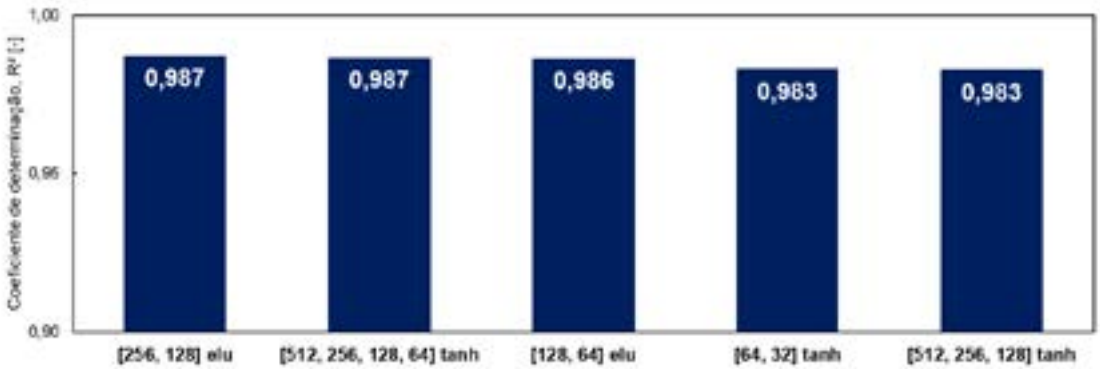
Arquitetura	Camadas Ocultas	Total de Neurônios	Distribuição de Neurônios
[64, 32]	2	96	64 → 32
[128, 64]	2	192	128 → 64
[256, 128]	2	384	256 → 128
[512, 256, 128]	3	896	512 → 256 → 128
[512, 256, 128, 64]	4	960	512 → 256 → 128 → 64



Figuras 5 Resultados de MAE para os cinco modelos de RNA que apresentaram melhor desempenho.



Figuras 6 Resultados de MSE para os cinco modelos de RNA que apresentaram melhor desempenho.



Figuras 7 Resultados de R^2 para os cinco modelos de RNA que apresentaram melhor desempenho.

Os dados experimentais envolvem relações não lineares e acopladas entre as variáveis de entrada. A tensão de escoamento, por exemplo, não cresce linearmente com a deformação, sendo fortemente influenciada pela velocidade de deformação e, sobretudo, pela temperatura [18]. As melhores arquiteturas identificadas possuem múltiplas camadas com número progressivamente menor de neurônios — estrutura piramidal. Esse tipo de arquitetura permite extrair representações de alto nível a partir das variáveis de entrada e garante capacidade de generalização, ao reduzir gradualmente a dimensionalidade e focar nas interações mais relevantes.

As funções de ativação elu e tanh foram as que apareceram nas melhores combinações. Exponential Linear Unit (elu) tem como vantagem a suavidade e a capacidade de lidar melhor com gradientes negativos, o que favorece o aprendizado em profundidade [24]. Já a função tanh é simétrica em torno de zero, o que ajuda em tarefas de regressão e melhora a convergência do treinamento. A escolha dessas funções em arquiteturas profundas contribuiu para um treinamento mais estável e uma melhor representação das variações suaves nos dados [25].

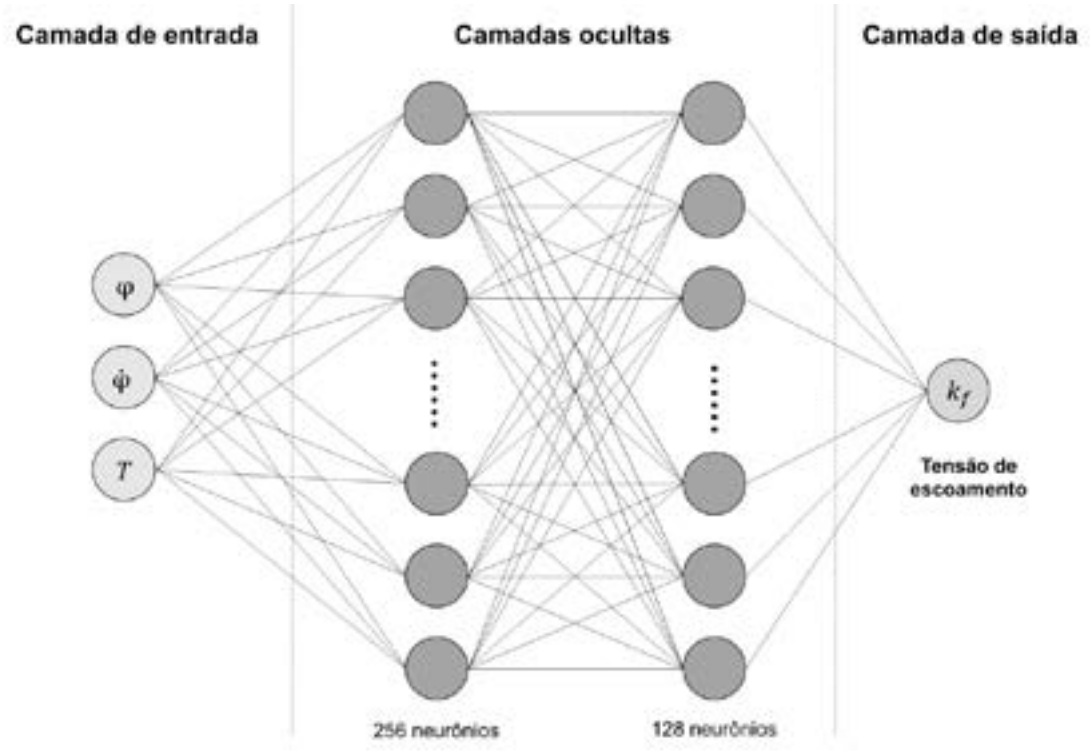


Figura 8 Desenho esquemático da arquitetura de RNA.

As melhores arquiteturas atingiram o equilíbrio entre capacidade de ajuste e robustez contra sobreajuste. Arquiteturas muito simples não capturam a complexidade do fenômeno, enquanto redes excessivamente profundas podem superajustar os dados.

A Figura 8 ilustra a arquitetura da Rede Neural Artificial (RNA) selecionada como a mais eficaz para prever a tensão de escoamento da liga AA 5052-H32 . Na camada de entrada da RNA são fornecidos os dados de deformação (φ), velocidade de deformação ($\dot{\varphi}$) e temperatura (T), que caracterizam as condições de deformação do material durante os ensaios de tração. Esses dados são conectados à primeira camada oculta, que contém 256 neurônios. Em seguida, os sinais processados são transmitidos para uma segunda camada oculta com 128 neurônios. Ambas as camadas utilizam a função de ativação ELU (Exponential Linear Unit). A camada de saída possui apenas um neurônio, responsável por gerar o valor estimado de tensão

de escoamento (K_f). Todas as conexões entre neurônios são densamente conectadas, ou seja, cada neurônio de uma camada está ligado a todos os neurônios da camada seguinte, permitindo que a rede capture interações complexas entre as variáveis de entrada.

As Figuras 9 e 10 mostram as curvas de aprendizado para MAE e MSE do modelo de RNA, As curvas demonstram um comportamento típico de um treinamento bem-sucedido de RNA [26]. Logo nas primeiras épocas (até cerca da 20ª), observa-se uma queda acentuada nos erros de treinamento e validação, indicando que o modelo está aprendendo rapidamente os padrões presentes nos dados.

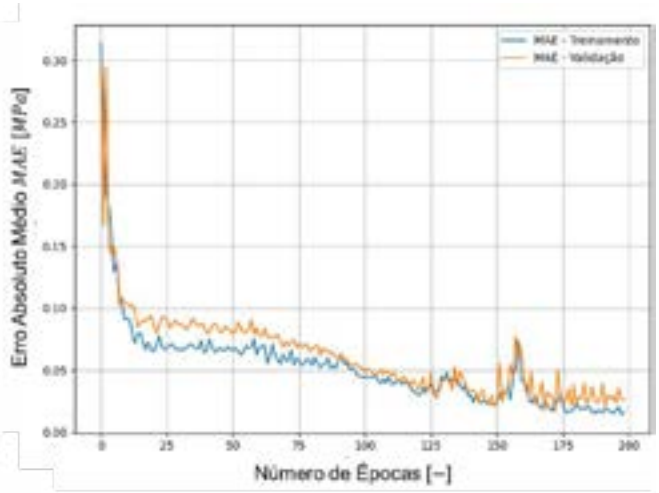


Figura 9 Curvas de aprendizado do modelo de RNA com MAE em função do número épocas.

Após esse ponto, ambos os erros continuam diminuindo de forma mais suave e estabilizam-se a partir de aproximadamente 100 épocas, com pequenas oscilações naturais, principalmente na curva de validação. Esse tipo de oscilação é esperado em RNAs bem ajustadas, sobretudo em problemas com dados experimentais que apresentam dispersão.

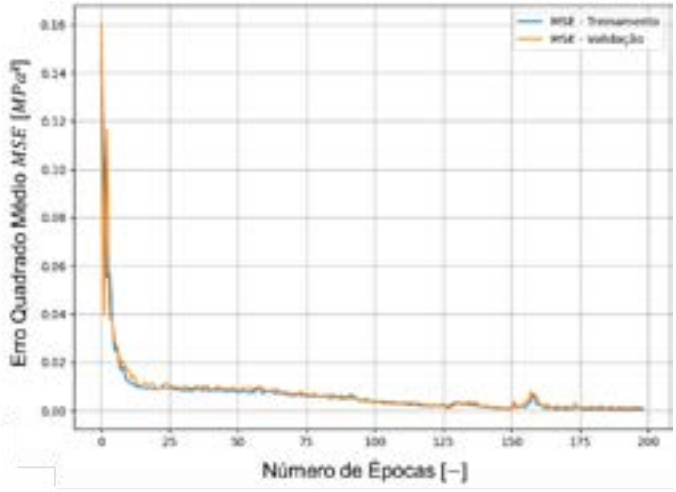


Figura 10 Curvas de aprendizado do modelo de RNA com MSE em função do número épocas.

A proximidade entre os valores de erro nos conjuntos de treinamento e validação indica que o modelo possui boa capacidade de generalização, sem sinais evidentes de overfitting. A arquitetura escolhida — com duas camadas ocultas de 256 e 128 neurônios, ativação elu e regularização via EarlyStopping — mostrou-se adequada à

natureza dos dados, que envolvem relações não lineares entre deformação, velocidade de deformação e temperatura.

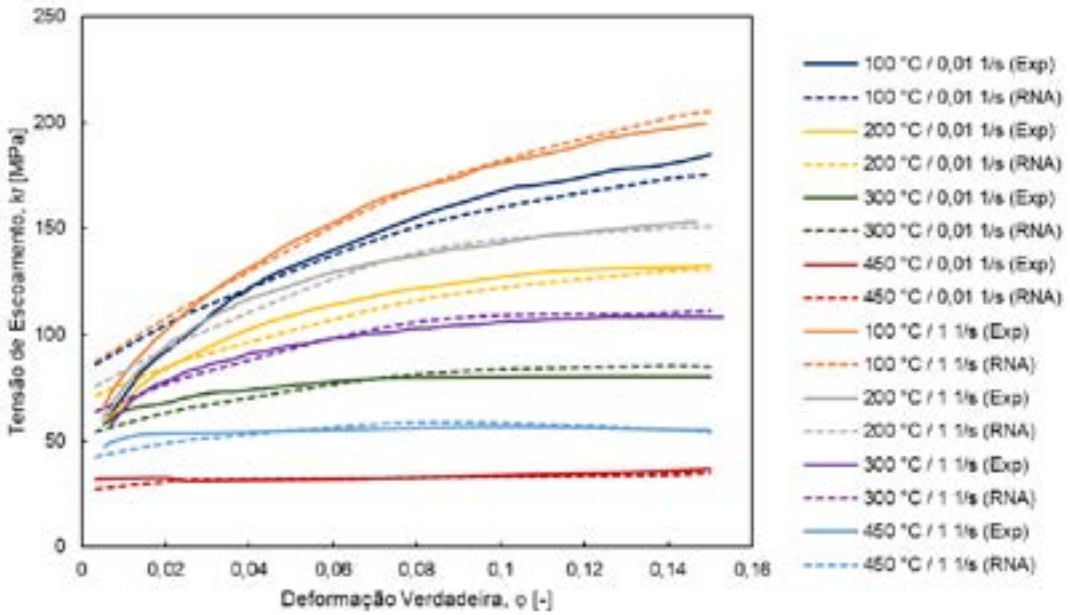


Figura 11 Comparação das curvas de escoamento da liga AA 5052-H32 experimentais e previstas pelo modelo de RNA.

Os valores finais das métricas de desempenho no conjunto de teste foram MAE = 3,61 MPa e MSE = 19,09 MPa² evidenciando a alta acurácia do modelo e confirmam a robustez da Rede Neural Artificial (RNA) na predição da tensão de escoamento da liga AA 5052-H32 sob diferentes condições de deformação.
A Figura 11 reforça esses resultados ao apresentar a sobreposição entre as curvas de escoamento experimentais e aquelas previstas pelo modelo de RNA, evidenciando sua capacidade de capturar com precisão o comportamento não linear do material. Diferentemente do modelo de Hensel-Spittel, que apresentou limitações na previsão da resposta do material sob deformação a 450 °C, o desempenho da RNA mostrou-se consistente e robusto em todas as condições de ensaio, sem sensibilidade significativa às variações de temperatura e velocidade de deformação.

3.4 Modelo de eXtreme Gradient Boosting

O XGBoost é um algoritmo de aprendizado de máquina baseado em gradiente boosting com árvores de decisão como estimadores base [27]. Ele constrói uma sequência de árvores, onde cada nova árvore é treinada para corrigir os erros residuais da anterior, aprimorando progressivamente a previsão.

Neste trabalho, o modelo XGBoost foi treinado para prever a tensão de escoamento da liga AA 5052-H32 com base em dados experimentais. Foi utilizada uma configuração com 100 árvores de decisão. O aumento no número de árvores tende a melhorar a capacidade do modelo de capturar padrões complexos, mas também pode aumentar o risco de overfitting, especialmente se não houver controle sobre outros hiperparâmetros [28].

Foi definida uma profundidade máxima de 4 para cada árvore. Esse parâmetro controla o número de divisões (níveis) que uma árvore pode realizar, Árvores com profundidade menor são menos propensas a se ajustar ao ruído dos dados (overfitting), resultando em modelos mais simples e generalizáveis. Ao limitar a

profundidade a 4, o modelo é incentivado a combinar várias árvores fracas, o que favorece a robustez do conjunto preditivo final.

A taxa de aprendizado do modelo foi definida como 0,1, o que significa que cada nova árvore adiciona apenas 10% da sua contribuição prevista à predição final. Esse parâmetro atua como um fator de regularização, tornando o processo de aprendizado mais lento e controlado. Dessa forma, o modelo é capaz de ajustar-se aos dados de maneira mais estável, reduzindo o risco de oscilações bruscas ou sobreajuste precoce. Embora exija mais iterações para convergir, essa abordagem tende a gerar modelos com melhor capacidade de generalização [29].

A Figura 12 ilustra esquematicamente o funcionamento do modelo de regressão XGBoost desenvolvido para prever a tensão de escoamento da liga AA 5052-H32 com base em dados experimentais de deformação (φ), velocidade de deformação ($\dot{\varphi}$) e temperatura (T), Durante o processo de treinamento, o modelo constrói sucessivamente 100 árvores de decisão, Cada árvore pode receber um subconjunto dos dados utilizar os resíduos do modelo anterior como alvo para aprimorar as previsões, D_1, D_2, ,,,, D_n representam os dados que alimentam cada uma dessas árvores em diferentes etapas do boosting, Cada árvore produz uma predição parcial da tensão de escoamento (representadas como W_1, W_2, ,,,, W_n), que corrige os erros acumulados nas etapas anteriores.

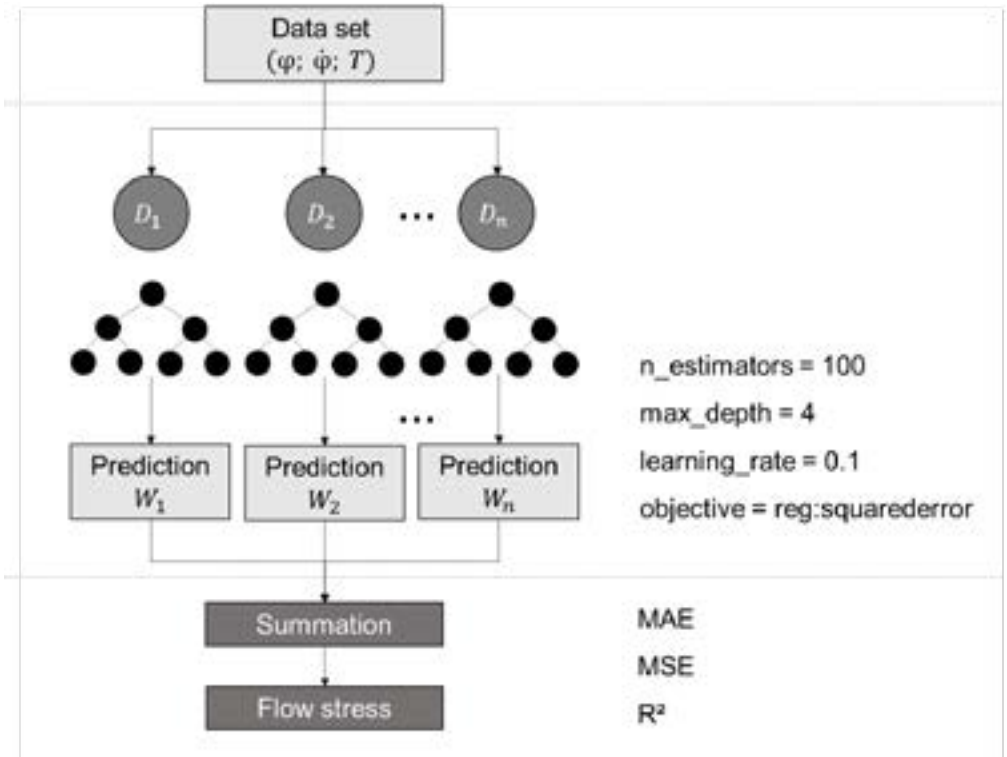


Figura 12 Desenho esquemático do funcionamento do modelo de regressão XGBoost.

As predições parciais de cada árvore não são somadas integralmente. Em vez disso, o modelo aplica um fator de aprendizado (learning_rate = 0,1). A soma ponderada de todas as árvores resulta na previsão final da tensão de escoamento.
As curvas de aprendizado do modelo XGBoost, apresentadas em função do número de árvores de decisão (Figuras 13 e 14), revelam uma tendência de convergência estável tanto para o erro absoluto médio (MAE) quanto para o erro quadrático médio (MSE), Observa-se que, após cerca de 60 estimadores, os erros se estabilizam, indicando que o modelo atinge um equilíbrio entre ajuste e generalização.

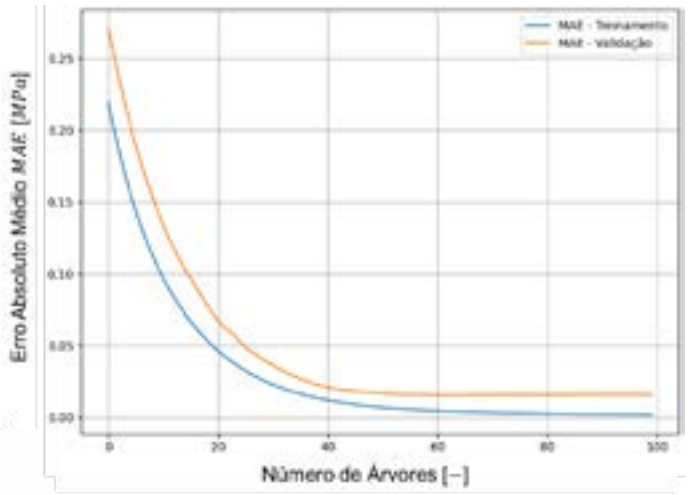


Figura 13 Curvas de aprendizado do modelo XGBoost, com MAE em função do número de árvores de decisão.

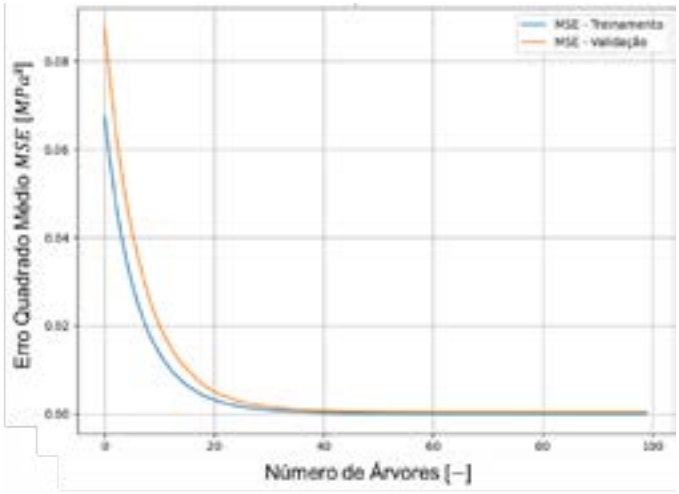


Figura 14 Curvas de aprendizado do modelo XGBoost, com MSE em função do número de árvores de decisão.

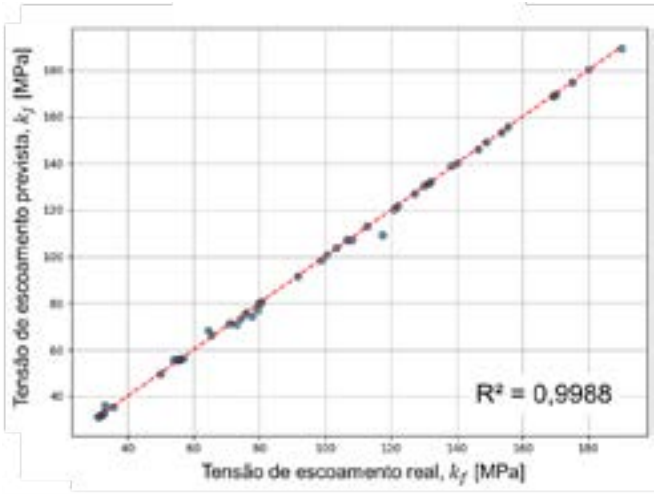


Figura 15 Gráfico de dispersão entre os valores reais e previstos pelo modelo XGBoost.

Ao final do treinamento com 100 árvores, o modelo apresentou um MAE de 0,7389 MPa e um MSE de 2,4585 MPa², valores notavelmente baixos no contexto da previsão da tensão de escoamento da liga AA 5052-H32. A proximidade entre os erros

nos conjuntos de treinamento e validação sugere que o modelo aprendeu de forma eficiente sem apresentar overfitting, confirmando sua capacidade de capturar com precisão os padrões complexos presentes nos dados experimentais.

O excelente desempenho do modelo também é evidenciado pela análise do gráfico de dispersão entre os valores reais e previstos da tensão de escoamento (Figura 15). A maior parte dos pontos está concentrada ao longo da linha de referência 1:1, demonstrando uma correspondência quase perfeita entre os valores observados e as predições do modelo, O coeficiente de determinação (R^2) foi de 0,9988, indicando que mais de 99,8% da variabilidade dos dados reais é explicada pelas predições geradas.

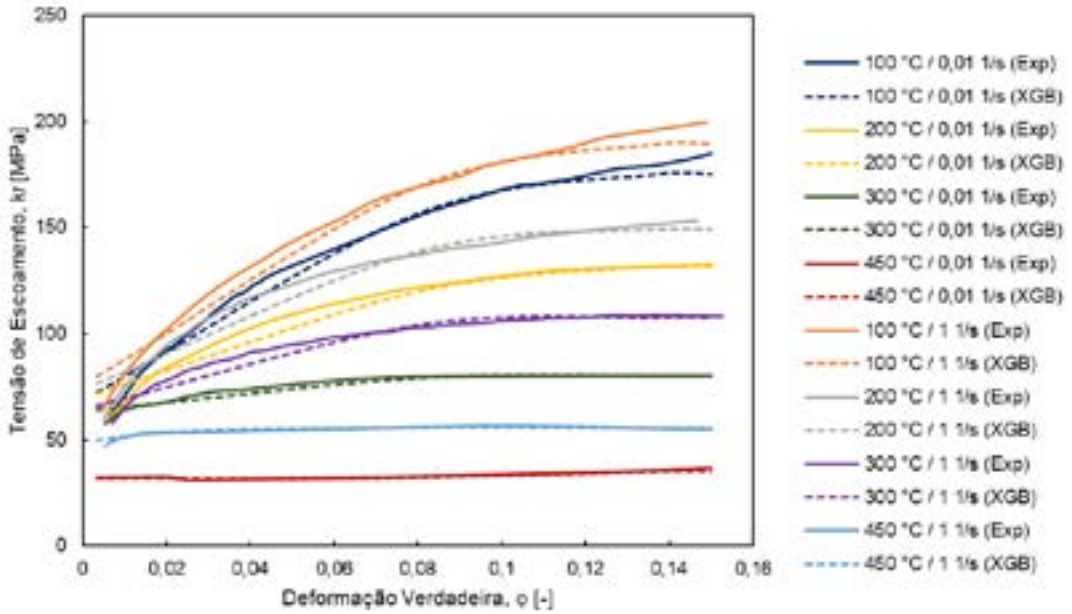


Figura 16 Comparação das curvas de escoamento da liga AA 5052-H32 experimentais e previstas pelo modelo XGBoost.

A Figura 16 apresenta a comparação entre as curvas de escoamento obtidas experimentalmente e aquelas previstas pelo modelo XGBoost para a liga AA 5052-H32. Observa-se um excelente alinhamento entre os dados reais e os valores estimados, evidenciando a alta capacidade preditiva do modelo para todas as condições analisadas. Esse desempenho confirma a robustez e a eficácia do XGBoost como abordagem de modelagem para descrever o comportamento de escoamento do material, mesmo diante da complexidade não linear das relações entre deformação, velocidade de deformação e temperatura.

O excelente desempenho obtido pelo modelo XGBoost na previsão da tensão de escoamento pode ser atribuído a uma combinação de fatores inerentes à sua arquitetura e ao tipo de dados utilizados. Primeiramente, trata-se de um algoritmo baseado em árvores de decisão, o que o torna especialmente eficaz para lidar com relações não lineares, como aquelas observadas em curvas de escoamento de materiais metálicos. Além disso, o XGBoost é reconhecido por sua eficiência mesmo em bases de dados relativamente pequenas, o que é particularmente vantajoso em contextos experimentais, nos quais a obtenção de grandes quantidades de dados pode ser limitada [29]. Outro diferencial importante é sua capacidade de capturar interações complexas entre as variáveis de entrada $(\varphi, \dot{\varphi}, T)$, o que permite modelar adequadamente a influência combinada desses parâmetros sobre a resistência do

material, Por fim, o algoritmo incorpora técnicas de regularização durante o processo de treinamento, o que contribui para evitar overfitting e melhorar a capacidade de generalização do modelo. Esses aspectos tornam o XGBoost particularmente adequado para problemas de previsão em ciência dos materiais e engenharia de processos.

4. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou a caracterização experimental do comportamento de deformação a quente da liga de alumínio AA 5052-H32, submetida a ensaios de tração em diferentes temperaturas e velocidades de deformação. Com base nos dados experimentais, o comportamento mecânico do material foi modelado por meio de três abordagens distintas: o modelo fenomenológico de Hensel-Spittel e dois modelos baseados em Inteligência Artificial — Redes Neurais Artificiais (RNA) e o algoritmo eXtreme Gradient Boosting (XGBoost).

O modelo de Hensel-Spittel apresentou bom desempenho preditivo, com coeficiente de determinação $R^2 = 0,9847$, sendo eficaz para representar as principais tendências do escoamento do material. No entanto, observou-se que as abordagens baseadas em IA apresentaram desempenho superior, especialmente na modelagem de relações não lineares complexas entre as variáveis de entrada.

A RNA, treinada com arquitetura otimizada e função de ativação ELU, alcançou métricas satisfatórias (MAE = 3,61 MPa e MSE = 19,09 MPa^2), demonstrando boa capacidade de generalização e estabilidade de aprendizado. Por sua vez, o modelo XGBoost apresentou os melhores resultados entre os métodos avaliados, com MAE = 0,74 MPa, MSE = 2,46 MPa^2 e $R^2 = 0,9988$, revelando excelente acurácia na predição da tensão de escoamento da liga AA 5052-H32.

As técnicas baseadas em Inteligência Artificial, em especial o XGBoost, representam ferramentas promissoras para a modelagem do comportamento de materiais em processos de conformação a quente, sendo capazes de superar abordagens tradicionais em termos de precisão, adaptabilidade e robustez preditiva.

REFERÊNCIAS

[1] LAHAYE, C., et al. Contribution of Aluminium to the Multi-Material Light-Weight BIW Design of SuperLight-Car (SLC). Aluminium International Today. V. 21 No. 5. 2009.

[2] AUMÜLLER M., Sicherheit und Leichtbau mit AMAG Aluminium, AluReport, AMAG TopForm UHS: Durchbruch im Karosserieleitbau. pp. 14 a 15. 2014.

[3] HIRSCH, J., et al. Hot Forming of Aluminium for Light-Weight Car Design. Aluminium International Today. Aachen, Germany. pp. 2388 a 2393. 2008.

[4] AKKIREDDY, L. A., et al. Formability Studies of Automotive Aluminium Alloy Sheet series: A Review, E3S Web of Conferences. Vol. 184. 2020.

[5] JU, L., ALTAN, T., Forming Al Alloys at Elevated Temperatures, Part I - Stamping Journal. 2015.

[6] ZHOU, J. et al. Forming Defects in Aluminum Alloy Hot Stamping of Side-Door Impact Beam, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, Volume 24, Issue 11, 2014.

[7] BRÜNGER, E., ENGLER, O., HIRSCH, J. Al−Mg−Si Sheet for Autobody Application. Virtual Fabrication of Aluminium Products. Chapter 1−6. Weinheim: Wiley-VCH Verlag. pp. 51−61. 2006

[8] ZHOU, J., ZHANG, J., MA, M. Study on the Formability of Aluminum Alloy Sheets at Room and Elevated Temperatures. Materials Science Forum. Vol. 877. P. 393 – 399. 2017.

[9] GAO, Song; SANG, Ye; LI, Qihan; SUN, Yingli; WU, Yuhang; WANG, Haoran. Constitutive modeling and microstructure research on the deformation mechanism of Ti-6Al-4V alloy under hot forming condition. Journal of Alloys and Compounds, v. 892, p. 162128, 5 fev. 2022.

[10] CHEN, Yiqi; LI, Hong; ZHANG, Song; LUO, Jiao; TENG, Junfei; LV, Yanlong; LI, Miaoqian. Hot tensile deformation behavior and constitutive models of GH3230 superalloy double-sheet. Materials, v. 16, n. 2, p. 803, 2023.

[11] MEHTEDI, M. El; MUSHARAVATI, F.; SPIGARELLI, S. Modelling of the flow behaviour of wrought aluminium alloys at elevated temperatures by a new constitutive equation. Materials and Design, v. 54, p. 869–873, 2014.

[12] J.D. Yoo, M.C. Kim, E.J. Kim, M.K. Razali, M.S. Joun, Flow stress characterization of magnesium alloys at elevated temperatures: A review, J. Phys. Conf. Ser. 2047 (1) (2021) 012002.
[13] SAVAEDI, Zeinab; MOTALLEBI, Reza; MIRZADEH, Hamed. A review of hot deformation behavior and constitutive models to predict flow stress of high-entropy alloys. Journal of Alloys and Compounds, v. 903, 2022, p. 163964.
[14] Cao, J., Bambach, M., Merklein, M., Mozaffar, M., & Xue, T. (2024). Artificial intelligence in metal forming. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 73(1), 561-587.
[15] P. Opěla, I. Schindler, P. Kawulok, R. Kawulok, S. Rusz, K. Rodak, Hot flow curve description of CuFe2 alloy via different artificial neural network approaches, J. Mater. Eng. Perform. 28 (8) (2019) 4863–4870.
[16] S.A. Sani, G.R. Ebrahimi, H. Vafaeenezhad, A.R. Kiani-Rashid, Modeling of hot deformation behavior and prediction of flow stress in a magnesium alloy using constitutive equation and artificial neural network (ANN) model, J. Magnes. Alloy. 6 (2) (2018) 134–144.
[17] H. Ahmadi, H.R. Ashtiani, M. Heidari, A comparative study of phenomenological, physically-based and artificial neural network models to predict the hot flow behavior of API 5CT-L
[18] Rosiak, A., Schmeling, M., Marcelino, R. et al. Machine learning applied to predict the flow curve of steel alloys. Int J Adv Manuf Technol 134, 5481–5492 (2024).
[19] S. Mandal, P.V. Sivaprasad, S. Venugopal, Capability of a feed-forward artificial neural network to predict the constitutive flow behavior of as cast 304 stainless steel under hot deformation, J. Eng. Mater. Technol. 129 (2007) 242–247.
[20] Y.C. Lin, J. Zhang, J. Zhong, Application of neural networks to predict the elevated temperature flow behavior of a low alloy steel, Comput. Mater. Sci. 43 (4) (2008) 752–758.
[21] H. Mirzadeh, J.M. Cabrera, A. Najafizadeh, Modeling and prediction of hot deformation flow curves, Metall. Mater. Trans. A 43 (1) (2012) 108–123.
[22] LI, Yantao; DONG, Wenzheng; LIN, Qiquan; WANG, Zhigang. Constitutive model and plate forging ability of 5052 aluminum alloy under different temperatures. In: DAEHN, G. et al. (eds.). Forming the Future. The Minerals, Metals & Materials Series, 2021.
[23] Wang, Y.; Wu, X.; Li, X.; Xie, Z.; Liu, R.; Liu, W.; Zhang, Y.; Xu, Y.; Liu, C. Prediction and Analysis of Tensile Properties of Austenitic Stainless Steel Using Artificial Neural Network. Metals 2020, 10, 234.
[24] ÇATALBAŞ, Burak; MORGÜL, Ömer. Deep learning with ExtendeD Exponential Linear Unit (DELU). Neural Computing and Applications, v. 35, p. 22705–22724, 2023.
[25] WANG, Yingying; LI, Yibin; SONG, Yong; RONG, Xuewen. The influence of the activation function in a convolution neural network model of facial expression recognition. Applied Sciences, v. 10, n. 5, p. 1897, 2020.
[26] Fernández D.M., Rodriguez-Prieto A., Xamacho A.M., Prediction of the Bilinear Stress-Strain Curve of Aluminum Alloys Using Artificial Intelligence and Big Data, Metals 2020, 10(7), 904.
[27] CHEN, Tianqi; GUESTRIN, Carlos. XGBoost: A scalable tree boosting system. In: Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining – KDD '16. p. 785–794, 2016.
[28] NGUYEN, Hoang D.; DAO, Nhan D.; SHIN, Myoungsu. Prediction of seismic drift responses of planar steel moment frames using artificial neural network and extreme gradient boosting. Engineering Structures, v. 242, p. 112518, 1 set. 2021.
[29] BENTÉJAC, Candice; CSÖRGŐ, Anna; MARTÍNEZ-MUÑOZ, Gonzalo. A comparative analysis of gradient boosting algorithms. Artificial Intelligence Review, v. 54, p. 1937–1967, 2021.

44º SENAFOR

28th International Forging Conference
14th International Sheet Metal Forming Conference / 11th BrDDRG Congress
14th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies – Brazil/RS
3rd International Conference on Innovation in Materials and Manufacturing Hotel Plaza São Rafael – P. Alegre RS, October 1-3, 2025

Parametrização de sistemas de laser para otimização de contraste na marcação para estudo de estampabilidade incremental de chapas de alumínio

Parameterization of laser systems for contrast optimization in marking for the study of incremental formability of aluminum sheets

Paulo Vitor Fedri Carvalho (1)
Rafael Gustavo Schreiber (2)
Rafael Santiago Floriani Pereira (1)
Marcio Celso Fredel (1)
Milton Pereira (1)

Resumo

A Estampagem Incremental de Chapas é uma técnica de fabricação flexível e de baixo custo, porém a medição precisa da deformação ainda representa um desafio devido às limitações dos métodos convencionais de gravação por ataque eletroquímico. Este estudo investiga o uso da marcação a laser como técnica alternativa para a avaliação da estampabilidade em ligas de alumínio da série 1200H4. Dois sistemas a laser foram avaliados: um laser de CO_2 (Translaser CO2-30) e um laser Nd:YAG (Translaser 20QE), em comparação com o ataque eletroquímico convencional. As marcações foram analisadas em termos de reprodutibilidade, fidelidade geométrica, contraste e remoção de material, utilizando microscopia óptica, análise em escala de cinza e perfilometria óptica. Os resultados demonstram que os parâmetros 1 e 2 do laser Nd:YAG apresentaram o melhor desempenho geral, com alto contraste, marcações reprodutíveis e boa definição geométrica, embora com maior remoção de material superficial. O parâmetro 3 apresentou desempenho comparável ao

ataque eletroquímico, com dano mínimo ao material. Em contraste, as marcações realizadas com o laser de CO_2 exibiram baixa reprodutibilidade e os piores resultados em todos os critérios, principalmente devido à aplicação manual da camada de tinta. Esses achados demonstram o potencial da marcação a laser Nd:YAG como alternativa confiável e eficiente ao ataque eletroquímico para análise de deformações em ISF, contribuindo para o aprimoramento do monitoramento de processos e da previsão de estampabilidade.

Palavras chaves: Estampagem Incremental; Marcação a Laser; Contraste

Abstract

Incremental Sheet Forming (ISF) is a flexible and cost-effective manufacturing technique, but accurate strain measurement remains a challenge due to the limitations of conventional electrochemical etching methods. This study investigates the use of laser marking as an alternative technique for evaluating formability in aluminum alloy sheets (1200H4). Two laser systems were evaluated: a CO_2 laser (Translaser CO2-30) and a Nd:YAG laser (Translaser 20QE), alongside conventional electrochemical etching. Markings were analyzed in terms of reproducibility, geometric fidelity, contrast, and material removal using optical microscopy, grayscale analysis, and optical profilometry. The results demonstrate that Nd:YAG laser parameters 1 and 2 achieved the best overall performance, providing high contrast, reproducible markings, and accurate geometric definition, though with increased surface material removal. Parameter 3 showed performance comparable to electrochemical etching, with minimal material damage. In contrast, CO_2 laser markings exhibited poor reproducibility and the lowest performance across all criteria, largely due to manual ink application. These findings establish Nd:YAG laser marking as a reliable and efficient alternative to electrochemical etching for strain analysis in ISF, with potential to improve process monitoring and predictive accuracy of sheet formability.

Keywords: Incremental Sheet Forming; Laser Marking; Contrast

1. Introduction

Incremental Sheet Forming (ISF) is an innovative, dieless manufacturing process in which a CNC-controlled tool incrementally deforms a metal sheet into the desired geometry through localized plastic deformation. Unlike conventional stamping, ISF eliminates the need for dedicated dies, significantly reducing tooling costs and enabling rapid prototyping and small-batch production[1]. Recent advancements with robotic ISF allow a higher flexibility in the geometry obtained and higher control over the process[2]. This flexibility makes ISF particularly advantageous for industries requiring customized or low-volume components, such as aerospace, automotive, and biomedical sectors, where it

has been used to produce complex geometries like lightweight aircraft panels and patient-specific medical implants[3], [4], [5]. Despite its benefits, ISF faces challenges, including geometric inaccuracies due to springback, formability limits for high-strength materials, and process optimization for consistent quality[6], [7]. One challenge is the measurement of the formability, currently formability is measured through traditional methods, such as grid marking via electrochemical etching which has been widely used for strain analysis in sheet metal forming[8]. Electrochemical etching-based techniques present significant drawbacks, including time consuming preparation, surface quality and uniformity and require specialized dies for each marking pattern used[9].

Laser marking has emerged as a promising alternative due to its non-contact nature, high precision, and rapid processing capabilities[10]. Unlike electrochemical etching, laser marking minimizes thermal distortion and material degradation while enabling finer grid patterns for enhanced strain measurement resolution[11]. Recent advancements in laser technology have demonstrated its effectiveness in sheet metal testing, yet its application in ISF formability studies remains underexplored[12]. Few studies have systematically compared laser-marked strain analysis with conventional electrochemical etching-based methods, leaving uncertainties regarding measurement accuracy and process compatibility.

This study investigates the feasibility of laser marking as a superior alternative to electrochemical etching for formability evaluation in ISF. The objectives are threefold: (1) to compare geometric fidelity, contrast reproducibility and (2) to assess the influence of laser parameters on marking quality and material integrity. By addressing these aspects, the research aims to establish laser marking as a reliable, efficient technique for strain analysis in ISF, contributing to improved process monitoring and formability prediction.

2. Materials and methodology

2.1. Materials

Aluminum alloys of the 1200H4 series were cut into hexagons with 40mm sides and 0.7 mm thickness. Two distinct procedures were used to generate the marks on the samples. The first procedure utilized a CO_2 laser source model “Translaser CO2-30”, the specifications of the equipment can be seen in table 1, the samples were then uniformly coated with a commercially available black laser-absorbing paint (Laser Black) prior to laser treatment. The parameters utilized for the laser treatment are indicated in table 2.

Table 1: Specifications of laser source model “Translaser CO2-30”

Properties	Values
Wavelength (nm)	10600
Average power (W)	30
Bem quality (M2)	<1.8
Beam diameter (mm)	2 to 3
Pulse duration (ns)	100
Pulse repletion rate (kHz)	20 to 100

Table 2: First procedure parameters

	Scan speed (mm/s)	Power (%)	Frequency (kHz)
Parameter 1	200	100	25

The second procedure utilized a Nd:Yag laser source model “Translaser 20QE”, the specifications of the equipment are shown in table 3. The samples were then marked with three distinct laser parameters; these sets of parameters can be seen in table 4.

Table 3: Specifications of laser source model “Translaser 20QE”

Properties	Values
Wavelength (nm)	1060 to 1085
Average power (W)	20
Bem quality (M2)	<1.5
Beam diameter (mm)	6 to 8
Pulse duration (ns)	120
Pulse repletion rate (kHz)	30 to 60

Table 4: Second procedure parameters

	Scan speed (mm/s)	Power (%)	Frequency (kHz)
Parameter 1	1000	100	25
Parameter 2	200	100	25
Parameter 3	200	20	25

For the electrochemical etching the sheets were used a bench power supply set to 20 V, a graphite head connected to the negative terminal, and an aluminum base connected to the positive terminal. The sheets were placed on the aluminum base, with a stencil containing a grid of circles on their surface (Figure 3). The diameter and spacing of the stencil circles matched those etched on other sheets using a laser. A felt pad was fixed to the lower end of the graphite head using an elastic band. Before the process began, the felt pad and stencil

were moistened with a small amount of conductive electrolyte, composed of sodium chloride, lactic acid, nitric acid, and deionized water.

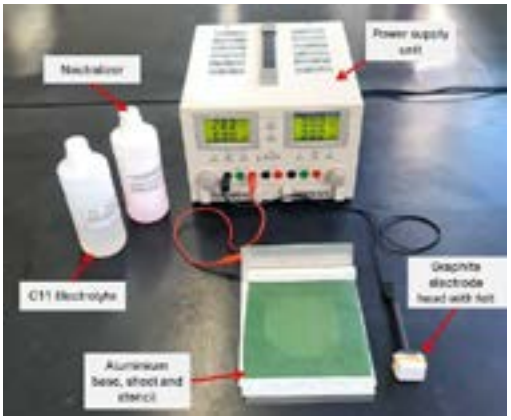


Figure 1: Electrochemical etching procedure.

The etching was performed manually by making three consecutive passes of the head over the stencil, maintaining a unidirectional linear motion at approximately 25 mm/s. After etching, the sheet was rinsed with running water to remove electrolyte residues. A small amount of neutralizer, containing magnesium chloride, potassium nitrate, sodium nitrite, and deionized water, was then applied to the sheet surface. Finally, the sheet was dried using a paper towel.

2.2. Surface analysis

Surface roughness analysis was performed using an Alicona InfiniteFocus G6 optical profiler. For each marking technique, a representative sample was selected. A linear profile was extracted from within the marked region using the proprietary MetMax software suite. This profile captured the topographical variation (height vs. distance) across the surface, from which the depth of the resulting grooves and surface roughness parameters was quantified.

The contrast was studied by capturing images with an optical microscope and then processing the images with ImageJ software. Grey filters were utilized to create an image normalization and equation 1 was used to find the contrast between the affected areas and raw areas.

$$C = \frac{N_n * N_f}{N_f} * 100\%$$

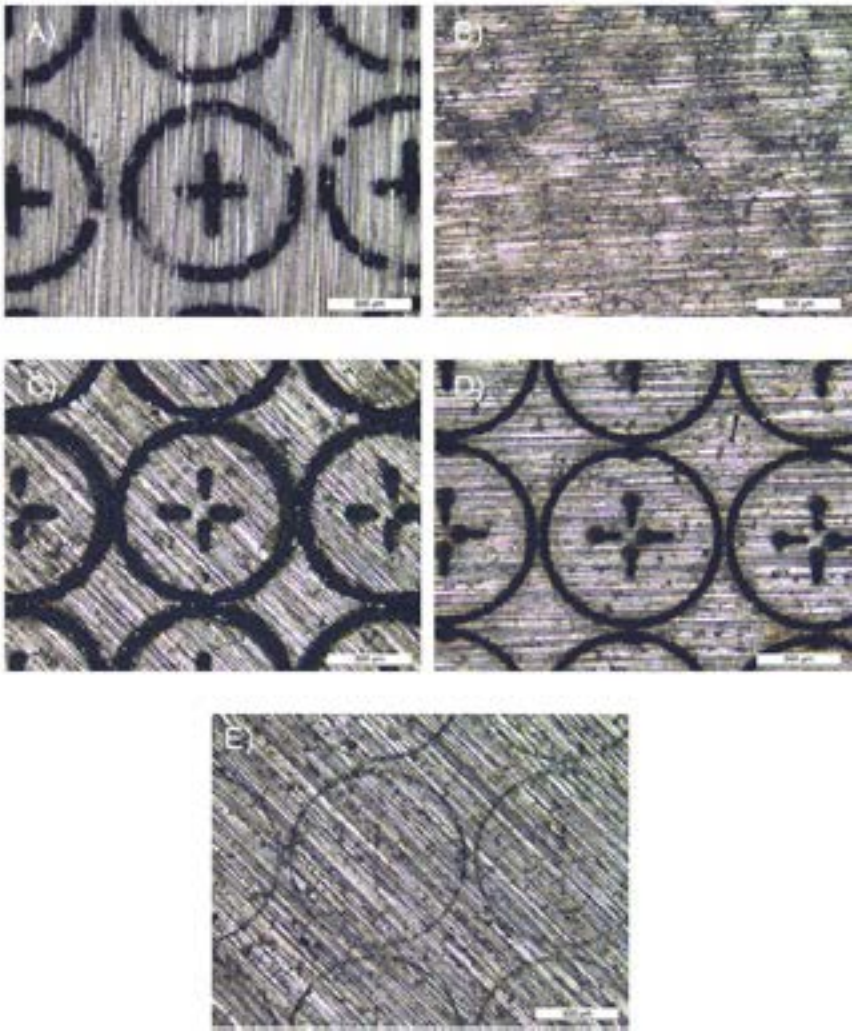
Where C is the contrast in percentage points, N_n is the intensity of the light reflected in the affected area by the laser, N_f is the intensity of the light reflected in the unaffected area by the laser. Analysis of continuous sections was also conducted to find the grey gradient between affected and non-affected areas.

3. Results and Discussions

3.1. Materials

Figure 2 illustrates the results obtained for each marking technique. All three Nd:YAG laser parameter sets applied to the aluminum plates produced reproducible markings, whereas the CO_2 laser did not yield reproducible results. This limitation is attributed to the manual application of the ink spray on the metal surface; the use of an automated system for ink deposition would likely enhance reproducibility. A similar limitation was observed for electrochemical etching, where irregularities in the markings were associated with the manual placement of the stencil.

Figure 2: Results obtained for each marking technique tested on aluminium sheets: A) Electrochemical etching, B) CO2 laser, C) Nd:Yag Paramater set 1, D) Nd:Yag Paramater set 2 and E) Nd:Yag Paramater set 3



3.2. Surface analysis

Table 5 presents the measured groove depths obtained for each of the marking techniques evaluated. The results indicate that the CO_2 laser and the

Nd:YAG laser under parameter set 3 produced negligible alterations to the surface. In contrast, electrochemical etching induced a lower degree of surface modification compared to Nd:YAG parameter sets 1 and 2, with the latter producing the most pronounced surface damage.

Table 5: Groove depth obtained in each technique analyzed by optical profiler.

Marking technique	Groove depth (μm)
Electrochemical etching	1.20 ± 0.21
CO_2 laser	0.13 ± 0.01
Nd:Yag Paramater set 1	14.26 ± 2.74
Nd:Yag Paramater set 2	12.68 ± 0.34
Nd:Yag Paramater set 3	0.16 ± 0.03

Table 6 presents the contrast values obtained for each technique. The results indicate that Nd:YAG parameter sets 1 and 3 yielded contrast values close to 50%. In comparison, electrochemical etching and Nd:YAG parameter set 2 produced higher contrast values of approximately 60%, whereas the CO_2 laser exhibited the lowest contrast, with a value of around 80%.

Table 6: Contrast obtained for marked areas through image processing software.

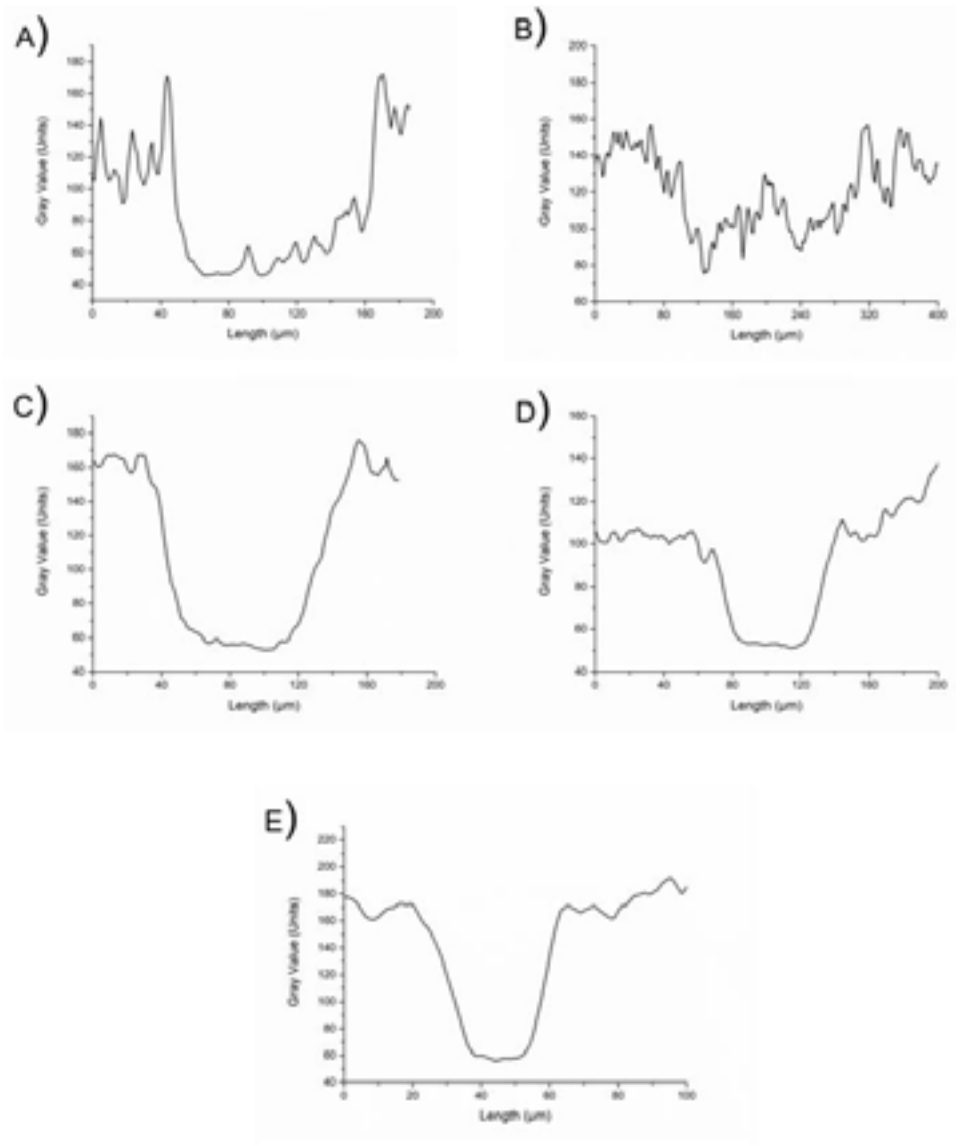
Marking technique	Contrast (%)
Electrochemical etching	59
CO_2 laser	80 ± 6
Nd:Yag Paramater set 1	51 ± 2
Nd:Yag Paramater set 2	53 ± 4
Nd:Yag Paramater set 3	59 ± 2

Table 7 reports the groove diameters of the marked regions obtained with each technique, as determined by grayscale analysis. This method assessed the gray-level gradient between unmarked and marked areas. A threshold value of 80 was selected, as this intensity was absent in unmarked regions. The results show that Nd:YAG laser parameter sets 1, 2, and 3 reached the threshold through a gradual transition, whereas electrochemical etching exhibited an abrupt transition characterized by a steeper gradient. In contrast, the CO_2 laser did not reach the threshold via a continuous gradient but rather through periodic approaches to the threshold value. The corresponding grayscale profiles for each technique are presented in Figure 3.

Table 7: Groove diameter obtained for marked areas through image processing software.

Marking technique	Groove diameter (μm)
Electrochemical etching	91.59 ± 5.44
CO_2 laser	251.36 ± 45.32
Nd:Yag Paramater set 1	70.51 ± 5.35
Nd:Yag Paramater set 2	63.68 ± 8.33
Nd:Yag Paramater set 3	20.8 ± 2.92

Figure 3: Representative curves of gray value over length of unmarked and marked areas: A) Electrochemical etching, B) CO2 laser, C) Nd:Yag Paramater set 1, D) Nd:Yag Paramater set 2 and E) Nd:Yag Paramater set 3



4.Conclusion

The results demonstrate that the Nd:YAG laser achieved the highest contrast, superior geometric fidelity, and reproducible markings under parameter sets 1 and 2, while parameter set 3 exhibited performance comparable to electrochemical etching in terms of contrast. In contrast, the CO_2 laser produced the least favorable outcomes across all three metrics, a limitation attributed to the manual application of the ink layer. Regarding material removal, Nd:YAG parameters 1 and 2 resulted in the greatest surface loss, which may adversely affect the conformability of the samples. Parameter set 3 induced substantially less material removal, while both the CO_2 laser and electrochemical etching produced negligible removal of surface material.

References

[1] M. Amino, M. Mizoguchi, Y. Terauchi, e T. Maki, “Current Status of ‘Dieless’ Amino’s Incremental Forming”, *Procedia Eng*, vol. 81, p. 54–62, jan. 2014, doi: 10.1016/J.PROENG.2014.09.128.

[2] N. A. Ismail, M. I. S. Ismail, M. A. M. Radzman, M. K. A. M. Ariffin, e A. As’arry, “Parametric optimization of robot-based single point incremental forming using Taguchi method”, *International Journal of Integrated Engineering*, vol. 11, no 1, p. 217–224, 2019, doi: 10.30880/IJIE.2019.11.01.023.

[3] R. Mohanraj e S. Elangovan, “Incremental sheet metal forming of Ti–6Al–4V alloy for aerospace application”, *https://doi.org/10.1139/tcsme-2018-0276*, vol. 44, no 1, p. 56–64, 2019, doi: 10.1139/TCSME-2018-0276.

[4] W. C. Emmens, G. Sebastiani, e A. H. van den Boogaard, “The technology of Incremental Sheet Forming—A brief review of the history”, *J Mater Process Technol*, vol. 210, no 8, p. 981–997, jun. 2010, doi: 10.1016/J.JMATPROTEC.2010.02.014.

[5] G. Ambrogio *et al.*, “Performances Analysis of Titanium Prostheses Manufactured by Superplastic Forming and Incremental Forming”, *Procedia Eng*, vol. 183, p. 168–173, jan. 2017, doi: 10.1016/J.PROENG.2017.04.057.

[6] S. ULLAH, X. LI, P. XU, Y. LI, K. HAN, e D. LI, “A toolpath strategy for improving geometric accuracy in double-sided incremental sheet forming”, *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 36, no 1, p. 468–479, jan. 2023, doi: 10.1016/J.CJA.2021.12.002.

[7] T. Trzepieciński, S. M. Najm, V. Oleksik, D. Vasilca, I. Paniti, e M. Szpunar, “Recent Developments and Future Challenges in Incremental Sheet Forming of Aluminium and Aluminium Alloy Sheets”, *Metals 2022,*

Vol. 12, Page 124, vol. 12, no 1, p. 124, jan. 2022, doi: 10.3390/MET12010124.

[8] R. G. Schreiber e L. Schaeffer, “Manufacture of absorber fins for solar collector using incremental sheet forming”, *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 8, no 1, p. 1132–1140, jan. 2019, doi: 10.1016/J.JMRT.2018.07.018.

[9] A. Pandey e S. Singh, “Current research trends in variants of Electrical Discharge Machining: A review”, *International Journal of Engineering Science and Technology*, vol. 2, no 6, p. 2172–2191, 2010.

[10] L. Lazov, H. Deneva, e P. Narica, “Laser Marking Methods”, *ENVIRONMENT. TECHNOLOGY. RESOURCES. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*, vol. 1, p. 108–115, jun. 2015, doi: 10.17770/ETR2015VOL1.221.

[11] J. Qi, K. L. Wang, e Y. M. Zhu, “A study on the laser marking process of stainless steel”, *J Mater Process Technol*, vol. 139, no 1–3, p. 273–276, ago. 2003, doi: 10.1016/S0924-0136(03)00234-6.

[12] C. Jasiński, A. Kocańda, Morawiński, e S. Świłło, “A New Approach to Experimental Testing of Sheet Metal Formability for Automotive Industry”, *Archives of Metallurgy and Materials; 2019; vol. 64; No 4; 1231-1238*, vol. 64, no 4, p. 1231–1238, 2019, doi: 10.24425/AMM.2019.130085.

RENOMAT
14ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis

PALESTRAS E TRABALHOS TÉCNICOS
LECTURES & TECHNICAL PAPERS

1 - Compósitos reforçados com fibras celulares para construções sustentáveis
Composites reinforced with cellulose fibers for sustainable constructions
GONZALO MARMOL DE LOS DOLORES - Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (IETCC, Madri, ESPANHA)

2 - Tendência de desenvolvimento dos sistemas domésticos de armazenamento de energia: Análise de caso no Nordeste Argentino
Development Trend of Household Energy Storage Systems: Case Study in Northeastern Argentina
LUIS HORACIO VERA – Universidad Nacional del Nordeste (UNNE, Corrientes, ARGENTINA)

3 - Desafios e Riscos: IA na Transição Energética no Peru
Challenges and Risks: AI in Peru's Energy Transition
EUNICE VILLICAÑA ORTIZ - Universidad de Tecnología de Peru (UTEC, Lima – PERU)

4 - Sistemas industriais inteligentes
Smart industrial systems
CESAR ROLANDO NUNURA NUNURA – Universidad de Tecnología de Peru (UTEC, Lima – PERU)

5 - Apresentação do Centro de Avaliação de Segurança, Desempeno e Caracterização de Materiais de Baterias para Veículos Elétricos
Presentation of the Center for the Evaluation of Safety, Performance and Characterization of Battery Materials for Electric Vehicles
MARÇAL JOSÉ RODRIGUES PIRES - Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS, Porto Alegre – BRASIL)

6 - Energizando a Equidade: Meninas e Mulheres Impulsionando a Transição Energética
Energizing Equity: Girls and Women Driving the Energy Transition
ALINE CRISTIANE PAN – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS, Porto Alegre – BRASIL)

7 - Aumento da vida útil de baterias de chumbo-ácido inundadas por meio de ciclos de carga/descarga com máxima tensão de equalização admissível e baixa intensidade de corrente
Increasing the lifespan of flooded lead-acid batteries through charge/discharge cycles with maximum admissible equalization voltage and low current intensity
Lúcio Albino Amaro da Silva e Lirio Schaeffer (UFRGS)

8 - A Integração do Grafeno nos Ânodos e Cátodos das Baterias de Íon de Lítio para Veículos Elétricos: uma Revisão
A Guide the Integration of Graphene in the Anodes and Cathodes of Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles: a Review
Guibson Souza dos Santos, Laura Emiliana Delgado Noguera, Fernando Luiz Peixoto, Sheila Santisi Travessa, Alex Fabiano Bueno (UFSC Blumenau)

9 - Utilização de Óxido de Grafeno como Modificador em Separadores de Baterias de Íon Lítio
Use of Grapjhene Oxide as a Modifier in Lithium-ion Battery Separators
Heldiane S. dos Santos, Thuany Maraschin, Giovanna Gabriela Ghilardi, Marçal José Rodrigues Pires (PGETEMA / PUCRS)

10 - Estudo teórico-prático de bateria auxiliar LiFePO4 de veículo elétrico comercial sinistrado
Theoretical-practical study of auxiliary Li-Ion battery from damaged commercial electric vehicle
Orides Jeremias Wachholz, Jorge Pimentel de Morais, Jonathan Pacini Bortolotto, Lucas Melo Machado (GEAG – CNPq), Marçal Rodrigues Pires (PGETEMA / PUCRS) e Vicente Mariano Canalli (ECPCVC)

11 - Análise da viabilidade técnica e validação da eficiência de coletores solares com placas absorvedoras de calor fabricadas por estampagem incremental
Technical Feasibility Analysis and Efficiency Validation of Solar Collectors with Heat Absorbing Plates Manufactured by Incremental Sheet Forming
Gilson de March, Marcos Antônio Jeremias Coelho, Guilherme Bampi Righeto, Max Gabriel Steiner, Anderson Daleffe, Daniel Fritzen (UNISATC) e Lirio Schaeffer (UFRGS)

12 - Desenvolvimento de ligas metálicas para produção de hidrogênio e reciclagem
Development of metallic alloys for hydrogen production and recycling
NOÉ CHEUNG – Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP, Campinas – BRASIL)

13 - Sistemas Fotovoltaicos e Baterias de Lítio
Photovoltaic Systems and Lithium Bateries
HUGO MARCELO VEIT – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS, Porto Alegre – BRASIL)

14 - Resistência ao Desgaste por Frição Oscilatória do Aço Microligado ao Vanádio DIN 38MnVS6 nas Condições a Seco e Lubrificado com Líquido Iônico
Oscillatory Friction Wear Resistance of Vanadium Microalloyed Steel Din 38MNVS6 in Dry and Ionic Liquid Lubricated Conditions
Sérgio Henrique Leite Aita, Vinicius Demetrio da Silva, Marcus Seferin e Carlos Alexandre dos Santos (PGETEMA / PUCRS)

15 - Acidentes Envolvendo Baterias Automotivas no Brasil: Causas, Consequências e Medidas de Prevenção
Accidents Involving Automotive Batteries in Brazil: Causes, Consequences, and Preventive Measures
Fábio Bergel e Marçal Rodrigues Pires (PGETEMA / PUCRS)

16 - Cabana sustentável uma alternativa viável e ecológica para sobrevivência econômica
Sustainable cabin a viable and ecological alternative for economic survival
Eduardo Duarte Cabral, Henrique Gabriel Cabral, Jorge Pimentel de Morais, Lucas Melo Machado, Marçal Rodrigues Pires, Vicente Mariano Canalli (PUCRS / CNPq / ECPCVC)

17 - Otimização da Capacidade de Células $LiFePO_4$ em Baixas Temperaturas com Uso de Controlador PI e Circuito de Potência com Modulação PWM para Aquecimento
Optimization of $LiFePO_4$ Cell Capacity at Low Temperatures Using a PI Controller and PWM-Modulated Power Circuit for Heating
Lucas Melo Machado (PUCRS), Marçal Rodrigues Pires (PGETEMA / PUCRS) e Vicente Canalli (ECPCVC)

18 - Alternativa para Reciclagem de Núcleos de Ferrita para Indutores Via Modelamento e Impressão 3D
Alternative for Recycling Inductor Ferrite Cores Via 3D Modeling and Printing
Eduardo Duarte Cabral, Henrique Gabriel Cabral, Jorge Pimentel de Morais, Lucas Melo Machado, Maria do Carmo Vieira, Marçal Rodrigues Pires, Vicente Mariano Canalli (PUCRS / CNPq / ECPCVC)

19 - Forma para Customização de Núcleo de Transformador de Conversor de Potência
Mid-range power converter design with custom recycled ferrite core
Eduardo Duarte Cabral, Henrique Gabriel Cabral, Jorge Pimentel de Morais, Lucas Melo Machado, Maria do Carmo Vieira, Marçal Rodrigues Pires, Vicente Mariano Canalli (PUCRS / CNPq / ECPCVC)

20 - Projeto Assistido por Computador orientado à Associação Mista de Módulo de Células de Combustível Diretas a Bioetanol
Computer Aided design oriented to mixed combination of direct ethanol fuel cells
Eduardo Duarte Cabral, Jorge Pimentel de Morais, Lucas Melo Machado (GEAG – CNPq), Marçal Rodrigues Pires (PGETEMA / PUCRS) e Vicente Mariano Canalli (ECPCVC)

21 - Projeto, roteamento e instalação de acessórios e dispositivos de iluminação e sinalização Pontual eficiente em protótipo de Tricicleta Elétrica
Design, Routing and Installation of Accessories and Devices Efficient Spot Lighting and signaling in Electric Tricyclet Prototype
Eduardo Duarte Cabral, Jorge Pimentel de Morais, Lucas Melo Machado (GEAG – CNPq), Marçal Rodrigues Pires (PGETEMA / PUCRS) e Vicente Mariano Canalli (ECPCVC)

22 - Estudo da Função e Distribuição de Circuitos de Veículos Elétrico Comercial Sinistrado com Base nas Caixas de Fusíveis de Proteção
Theoretical and practical study of the distribution and function of circuits of a damaged commercial electric vehicle based on the electromechanical protection and control module
Orides Jeremias Wachholz, Jorge Pimentel de Morais, Jonathan Pacini Bortolotto, Lucas Melo Machado (GEAG – CNPq), Marçal Rodrigues Pires (PGETEMA / PUCRS) e Vicente Mariano Canalli (ECPCVC)

23 - Estudo teórico-prático de adaptador de carga de veículo elétrico comercial
Theoretical-practical study of commercial electric vehicle charging adapter
Orides Jeremias Wachholz, Jorge Pimentel de Morais, Jonathan Pacini Bortolotto, Lucas Melo Machado (GEAG – CNPq), Marçal Rodrigues Pires (PGETEMA / PUCRS) e Vicente Mariano Canalli (ECPCVC)

24 - Importância da anexação da espécie veículo didático à classificação do artigo 96 do Código de Trânsito Brasileiro
Importance of Attaching the Type of Educational Vehicle to the Classification of Article 96 of the Brazilianb Traffic Code
Jorge Pimentel de Morais, Carlos Eduardo Bizarro Rambo, Lucas Melo Machado (GEAG – CNPq), Marçal Rodrigues Pires (PGETEMA / PUCRS) e Vicente Mariano Canalli (ECPCVC)

25 - Lacunas legislativas e normativas da avaliação dos danos causados a veículos automotores expostos por longo período de tempo a águas contaminadas.
Legistative and Regulatory Gaps in the Assessment of Damages Caused to Motor Vehicles Esposed for Long Periods of Time to Contaminated Water
Jorge Pimentel de Morais, Carlos Eduardo Bizarro Rambo, Lucas Melo Machado (GEAG – CNPq), Adriene Sampaio Pereira, Marçal Rodrigues Pires (PGETEMA / PUCRS) e Vicente Mariano Canalli (ECPCVC)

26 - Lacuna legislativa relacionada à tricicleta elétrica com pedal assistido de até 350W
Legislative Gap Related to Electric Tricyclet with Pedal Assisted Power of up to 350W
Jorge Pimentel de Morais, Carlos Eduardo Bizarro Rambo, Lucas Melo Machado (GEAG – CNPq), Marçal Rodrigues Pires (PGETEMA / PUCRS) e Vicente Mariano Canalli (ECPCVC)

TRABALHOS EM PÔSTER

PO01 - Baterias Estacionárias: Fatores Determinantes na Vida Útil e Ensaio em um Sistema Híbrido Eólico-Fotovoltaico
Stationary Batteries: Key Factors Affecting Service Life and a Case Study in a Wind-Solar Hybrid System
Polyane Cristina Panzenhagen Resende, Rafael Vargas Da Silva Fritsch, Nalini Da Silva Pereira, Alexandre Hugo Da Silveira e Aquiles Rossoni (PUCRS)

PO02 - Estimação de Geração de Energia Fotovoltaica: Análise Comparativa entre Softwares e Medições Reais
Estimation of Photovoltaic Energy Generation: Comparative Analysis Between Software Tools and Real Measurements
Rafael Vargas da Silva Fritsch, Polyane Cristina Panzenhagen Resende, Nalini Da Silva Pereira, Alexandre Hugo Da Silveira e Aquiles Rossoni (PUCRS)

Cellulose-Based Fiber-Reinforced Cement-Based Composites

Gonzalo Mármol

Eduardo Torroja Institute for Construction Science (IETcc-CSIC), Madrid, Spain

Keywords: Sustainable construction, Cellulose fiber-reinforced cement, Magnesium-based cements, Carbon-negative materials, Circular economy in construction

1. Need for more sustainable construction materials

The achievement of climate neutrality by 2050 requires profound transformations in multiple economic sectors, among which construction represents one of the most emission-intensive. According to various international initiatives, such as the Paris Agreement and the 2030 Agenda, there is an urgent need to reduce greenhouse gas emissions through the development and application of innovative materials with low carbon content, recycled or of biological origin. This transition must be addressed not only from an environmental perspective but also in terms of economic viability and social equity.

The 2030 Agenda, adopted by the United Nations General Assembly in 2015, establishes a global framework composed of 17 Sustainable Development Goals (SDGs), organized around three fundamental axes: social development, sustainable economic growth, and environmental protection. In the current context of accelerated climate change and increasing pressure on natural resources, it is a priority to integrate these principles into key sectors such as construction, responsible for approximately 39% of global CO_2 emissions [1]. The use of sustainable construction materials, circular design, and the implementation of policies consistent with international commitments are outlined as fundamental strategies to advance toward climate goals. Various strategic documents, such as the Advanced Materials for Europe Manifesto, emphasize the importance of promoting innovation in sustainable construction materials [2]. The use of natural, recycled, or locally sourced materials is especially encouraged, with the aim of reducing the extraction of virgin resources and improving the energy efficiency of construction systems. The choice of materials has a direct impact on the environmental performance of buildings and the promotion of circular economy models.

However, concrete continues to be the most widely used material in construction, due to its global availability, high mechanical strength, versatility, and relatively low cost. Nevertheless, its production generates significant environmental impacts, raising the need to develop alternatives that preserve its technical properties while minimizing its ecological footprint. Cement, an essential component of concrete, presents multiple environmental challenges throughout its life cycle. Among them, the overexploitation of raw materials (around 20 billion tons annually of aggregates and water), high energy consumption (approximately 7% of global industrial energy demand), and a considerable contribution to global CO_2 emissions (around 8%) stand out [3]. Current projections indicate that, if trends continue, these emissions could multiply by 2.5 by 2050 compared to 1990 levels. Additionally, the geographical pattern of consumption has drastically changed: while at the beginning of the 20th century industrialized countries concentrated the highest demand for cement, nowadays it has mostly shifted to developing countries. This change implies additional challenges for the implementation of sustainable solutions, as it requires adapting low-carbon technologies to contexts with limitations in financing, infrastructure, and access to clean technologies. Therefore, it is a priority to develop sustainable construction models that are scalable, affordable, and suitable for different socioeconomic environments.

In this context, in addition to reducing the environmental footprint through the use of recycled or locally sourced materials, it is key to explore technological solutions capable of efficiently

capturing and storing carbon. One of the most promising strategies combines the use of innovative cementitious compounds with bio-based resources, such as plant fibers, whose application is analyzed below [4].

1.1. Technological solutions to mitigate global change: photosynthesis as the most efficient technology

Carbon capture technologies, such as gas separation, chemical conversion, and the preparation technology of non-metallic elements and their compounds, coexist with highly efficient natural processes such as photosynthesis. Photosynthesis allows carbon fixation through solar energy, generating biomass with a favorable environmental balance [5]. In this framework, plant fibers stand out for their low density (1.6 g/cm³), reduced cost (~€10/t), and moderate mechanical properties (elastic modulus of 10–30 GPa). Their post-cracking reinforcement capacity and biodegradable nature make them candidates for low-carbon composite materials [6].

However, their incorporation into cementitious matrices presents technical challenges: water absorption, increased porosity, dimensional instability, and degradation in highly alkaline environments (pH > 12.5) [7]. These limitations require the development of non-conventional cements compatible with natural fibers, which reduce porosity and have a lower environmental impact. This approach allows progress toward sustainable structural materials, combining mechanical performance and climate mitigation.

2. Cellulose fiber-reinforced cement composites as sustainable materials

Cellulose fiber-reinforced cement composites constitute a sustainable alternative, integrating biogenic materials and low-carbon matrices. Cellulose, synthesized by photosynthesis from atmospheric CO_2, allows carbon fixation in solid form. After processing, the fibers provide structural reinforcement, thermal insulation, and rheological improvement. To optimize their performance, the matrix must limit alkalinity and prevent fiber degradation. The combination with eco-efficient cements allows significantly reducing emissions from the construction sector, aligning these solutions with decarbonization and circularity objectives in construction materials.

2.1. Examples of innovative composites

A promising solution for reinforcement with cellulosic fibers is the use of ternary cement–gypsum–pozzolan matrices. Partial substitution of cement with gypsum (up to 50%) and pozzolans such as fly ash or fluidized cracking catalysts reduces the matrix alkalinity, thus favoring the durability of recycled fibers such as kraft [8]. Additionally, the incorporation of sulfate-rich wastes improves the sustainability of the system and contributes to the progressive development of hydration products, which increases mechanical strength over time [9].

The development of carbonated fiber-cements reinforced with hornified plant fibers has also been investigated, combining a low-energy thermal treatment with optimized carbonation curing. Hornification improves mechanical behavior after aging cycles by reducing water retention, without significantly altering the fiber structure. On the other hand, controlled CO_2 curing promotes the formation of calcium carbonate ($CaCO_3$), densifying the matrix and improving its dimensional stability, as well as its durability and water resistance [10].

In the same line, sustainable particulate panels have been developed using Helianthus tuberosus stalks as dispersed reinforcement in cementitious matrices, following the requirements of ISO 8335. This approach, based on a dual curing process (conventional and in a CO_2-enriched atmosphere), has allowed reducing water absorption and swelling by 30–40%, while improving the yield strength by 25% and flexural strength by 35% compared to reference panels [11].

3. Magnesium-based cement systems

Various alternatives seek to reduce emissions in cement production, but according to the International Energy Agency [12], magnesium oxide-based cements derived from silicates (MOMS) are the only ones with the capacity to absorb more CO_2 than emitted during their manufacture and life cycle, achieving net-negative emissions. This balance is only sustainable if the magnesium comes from non-carbonate sources, such as silicate rocks. However, the industrial production of MOMS is not yet optimized, with the main challenge being the efficient obtention of MgO from silicates through energetically viable processes.

Interest in MgO-based cements, beyond MOMS, is growing especially in regions with abundant magnesium silicate resources or Mg-rich brines. These materials have potential for applications in conventional concretes and specialized uses, highlighting their ability to achieve a negative carbon footprint during curing. However, their structural implementation requires the development of alternative reinforcements and the optimization of scalable processes for MgO production and cementitious mixtures.

An emblematic case is Novacem Ltd., a pioneer in non-conventional cements, which developed the first clinker-free cement based on MgO instead of CaO. Its process drastically reduces emissions by operating at temperatures around 700°C (compared to 1450°C for Portland cement) and using non-carbonate raw materials. Additionally, it absorbs CO_2 during curing or in precursor production, achieving net emissions between -100 and 100 kg CO_2/ton, compared to ~800 kg CO_2/ton for Portland cement. This advance shows the potential of MgO cements to decarbonize the industry, although their industrial scaling still faces significant technical and economic challenges[13].

Magnesium cements comprise three main systems [14], among others, with differentiated properties and applications: magnesium oxychloride cements (MOC), which exhibit high initial strength and low thermal conductivity, being suitable for industrial floors and fire protection, although their durability in humid environments is limited; magnesium carbonate cements (MCC), which can achieve carbon-negative emissions through the formation of hydrated carbonates ($MgCO_3 \cdot xH_2O$) from the carbonation of $Mg(OH)_2$, although they require cost optimization and durability evaluation under various environmental conditions; and hydrated magnesium silicate cements (M-S-H), which form at room temperature by the reaction between reactive MgO and amorphous silica, characterized by low pH compatibility with natural fibers and greater stability, but with limitations derived from slow hydration kinetics and the high cost of reactive silica.

Currently, MOCs are the most commercially used, but MCCs and M-S-H offer greater sustainable potential in the long term, provided that technical and economic challenges for their industrial-scale production are overcome. The combination of these systems could enable the development of innovative construction materials with a low carbon footprint.

4. Applications of M-S-H cements

4.1. M-S-H cement composites reinforced with natural fibers: an advance in high-durability sustainable Materials

These materials, less than 10 years old, are innovative composites based on hydrated magnesium silicate cement (M-S-H) reinforced with lignocellulosic fibers, featuring a cementitious system ($MgO\text{-}SiO_2$) with reduced pH (11 vs. 13 for Portland at 7 days) that favors the integrity of natural fibers, showing higher compressive strength than conventional Portland at 28 days (w/c ratio = 0.5) thanks to a denser microstructure [15]. The composites demonstrate exceptional durability, maintaining fiber integrity after 200 severe accelerated aging cycles (6h drying at 60°C + 6h immersion in water at 50°C per cycle), confirming their dimensional stability and strength under

extreme conditions. This combination of low pH, high mechanical strength, and compatibility with natural fibers positions M-S-H as a sustainable application, overcoming the limitations of traditional cements by simultaneously offering improved durability and lower environmental impact.materiales

4.2. Carbon-negative composites with M-S-H matrix

This study develops innovative carbon-negative composites by combining an M-S-H cement matrix with cellulose reinforcements, processed as thin plates (5 mm) and cured in a CO_2-saturated atmosphere [16]. The optimization of curing temperature allows controlled carbonation that strategically modifies the material's porosity, refining its internal structure and promoting the formation of crystalline hydrated magnesium hydroxycarbonates (HMHC) alongside other poorly crystallized phases. Cellulose acts as a carbonation catalyst, significantly increasing the total volume of hydrated phases and allowing a higher fiber content in the matrix. The results are revolutionary: in addition to increasing flexural strength, the material achieves unprecedented toughness (>9 kJ/m²), far exceeding conventional values. This approach not only demonstrates how carbonation can enhance the mechanical properties of cementitious composites but also establishes a new standard in the design of sustainable structural materials, capable of combining high technical performance with a negative environmental footprint.

4.3. Valorization of agroindustrial wastes for sustainable M-S-H cements

There are studies demonstrating the potential of rice husk ash and bamboo leaf ash [17,18], calcined at low temperatures (500–550°C), as a source of reactive silica for sustainable M-S-H cements. These plant ashes, when combined with MgO through optimized curing, efficiently form M-S-H gel, achieving strengths similar to commercial silica fume. The process leverages low-cost agroindustrial wastes, reduces the carbon footprint by operating at lower temperatures than conventional methods, and maintains high mechanical performance. The results lay the foundation for producing advanced cements that combine waste valorization, energy efficiency, and improved properties, offering a sustainable and scalable alternative for construction. The developed methodology allows adjusting material properties through waste selection and treatment parameters, positioning these materials as a technically and environmentally viable solution.

5. Advances and challenges in the development of M-S-H cements for sustainable applications

5.1. Advances and challenges of M-S-H cements

Despite their potential as an alternative to Portland cements, M-S-H cements face key challenges. First, the low solubility of MgO hinders workability, although additives such as sodium hexametaphosphate (NaHMP) can improve fluidity without affecting strength. Second, long-term durability remains uncertain, as systematic research has been conducted for less than 15 years, requiring studies under real conditions to validate their performance. Third, the influence of impurities such as Al, Fe, and Ca on their rheological and mechanical properties is not well understood, demanding advanced microstructural analysis and controlled synthesis. These technical limitations hinder their widespread structural use, although their environmental potential remains promising.

5.2. Advances and challenges in the industrial implementation of carbonated magnesium cements (MCC)

The industrial scaling of MCCs requires addressing three fundamental aspects simultaneously: (1) identifying alternative magnesium sources to conventional $MgCO_3$, highlighting the use of industrial wastes such as cyclone dust; (2) market analysis, revealing their potential in the circular economy due to their carbonation capacity and negative footprint, although identifying specific

niches where they can compete technically and economically is necessary; and (3) optimization through predictive modeling, combining advanced experimental characterization with computational simulation to predict long-term behavior and stability. Despite these advances, key challenges persist, such as process scaling while maintaining properties, cost reduction through economies of scale, and validation in real structural applications—barriers that currently limit their mass adoption but are being overcome through multidisciplinary approaches accelerating their transition from lab to market.

5.3. Sustainable development of MOC cements through desalination waste valorization: Integration and property improvement

The sustainable development of MOC-type (magnesium oxychloride) cements from desalination wastes is based on an integral approach combining raw material optimization, integration into construction materials, and a circular value chain. Controlled thermal treatment of residual $Mg(OH)_2$ yields reactive MgO, while the $MgO/MgCl_2$ ratio and the use of phosphates (H_3PO_4, NaH_2PO_4, Na_3PO_4) improve mechanical strength and durability, especially against water. Establishing protocols for their incorporation into structural composites, evaluating compatibility with other materials, and validating their performance in real applications are key. At a systemic level, collaboration between brine suppliers, processing plants, and technology centers is promoted, as well as the use of solar pilot plants to scale processes and develop business models based on waste valorization. Notable technical properties have been achieved, such as strengths >50 MPa, stability in humid environments, and controllable setting. However, challenges remain: raw material variability, thermal treatment energy efficiency, and the need for regulatory certification. This approach demonstrates the potential of the circular economy to produce advanced cements with a low environmental footprint, although large-scale implementation requires overcoming technical and regulatory barriers.

5.4. 3D printing with MgO cements: Toward customized, efficient, and sustainable construction

An innovative application of MgO-based cements is their use in 3D printing for the construction of customized, high-precision elements. This technology enables the development of specifically formulated mixtures for 3D printing, leveraging the thixotropic properties of MgO and incorporating cellulose fibers as reinforcement, improving rheology through methylcellulose, reducing shrinkage, and increasing the structural integrity of printed parts. Additionally, the printing process can be optimized to induce controlled water evaporation, favoring greater CO_2 penetration and thus more efficient carbonation that increases the material's mechanical strength. The incorporation of nanoclays and methylcellulose also contributes to improving rheological properties during printing, while optimizing infill patterns and outer layer porosity maximizes both compressive strength and carbonation speed and depth. Together, this strategy reduces construction costs and time while promoting a sustainable, high-performance solution for future buildings.

6. Other aspects to consider in cement composites

6.1. Wastewater management in the fiber-cement industry

One of the main challenges in the production of cellulose fiber-reinforced cement composites is the efficient management of wastewater generated during the industrial process, especially in production lines using Hatschek or similar technology. To address this issue, the design and implementation of customized water treatment and recovery systems are proposed [19]. Recent analyses detected anion concentrations such as SO_4^{2-} exceeding permissible limits by up to ten times, along with relevant levels of cations such as K^+, Ca^{2+}, and metal traces. Given this complexity, a staged treatment is proposed, initially including CO_2 injection, which helps reduce

Na^+, SO_4^{2-}, and organic matter levels. Subsequently, the addition of reagents such as $Ca(OH)_2$ or $CaCl_2$ allows selective sulfate precipitation, with the latter being more effective although adding Na^+ and Cl^- to the system. Finally, implementing an ion exchange system with specific resins—cationic to remove Na^+ and K^+, and anionic to reduce SO_4^{2-} and Cl^-—enables finer water purification. This comprehensive strategy not only improves process sustainability but also contributes to preserving composite properties and reducing the environmental impact of the fiber-cement sector.

6.2. Advances and challenges in the development of cement-cellulose composites

The development of innovative composites based on cement and cellulose fibers presents multiple technical challenges, particularly in improving the fiber-matrix interface, where porosity generated after hydration and carbonation reactions of the cementitious matrix can compromise the material's mechanical properties. To address this limitation, durability optimization is being pursued through enhanced fiber-matrix connection, supported by advanced characterization and modeling techniques. A key approach is the incorporation of nanoparticles such as nanocellulose (CNC), which not only improves the composite's microstructure but also contributes to deformation control and increased material toughness. Concurrently, fiber surface functionalization treatments are being developed, aimed at optimizing their interaction with the matrix, especially through low-alkalinity solutions based on magnesium compounds. These treatments seek to preserve fiber integrity in aggressive cementitious environments and improve their homogeneous dispersion in the composite. Additionally, formulations exhibiting strain-hardening behavior, i.e., the ability to harden under deformation, are being explored, resulting in higher flexural strength, fatigue resistance, and resistance to phenomena such as creep or relaxation under sustained loads. Together, these advanced strategies pave the way for more sustainable, resistant, and structurally adaptable cementitious composites.

7. Concluding Remarks

Cellulose fiber-reinforced cement composites represent transformative solutions for sustainable construction, aligning with global decarbonization goals. These materials leverage bio-based resources, carbon sequestration, and waste valorization to reduce CO_2 emissions while maintaining structural performance. Challenges such as fiber durability in alkaline environments, industrial scalability, and long-term validation persist, but advances in matrix optimization, carbonation curing, and 3D printing demonstrate their potential. By integrating circular economy principles and low-carbon technologies, these innovations offer a viable pathway to mitigate the environmental impact of cement production and meet the demands of resilient, eco-efficient construction. Further research and cross-sector collaboration remain essential to overcome technical and economic barriers for widespread adoption.

References

1. Searchinger, T.; Peng, L.; Zionts, J.; Waite, R. The Global Land Squeeze: Managing the Growing Competition for Land. *WRIPUB* **2023**, doi:10.46830/wrirpt.20.00042.
2. Liu, Z.; Deng, Z.; Davis, S.; Ciais, P. Monitoring Global Carbon Emissions in 2022. *Nat Rev Earth Environ* **2023**, *4*, 205–206, doi:10.1038/s43017-023-00406-z.
3. Andrew, R.M. Global CO_2 Emissions from Cement Production, 1928–2018. *Earth Syst. Sci. Data* **2019**, *11*, 1675–1710, doi:10.5194/essd-11-1675-2019.
4. Savastano, H.; Warden, P.G. Special Theme Issue: Natural Fibre Reinforced Cement Composites. *Cement and Concrete Composites* **2005**, *27*, 517, doi:10.1016/j.cemconcomp.2004.09.014.
5. Kumaravel, V.; Bartlett, J.; Pillai, S.C. Photoelectrochemical Conversion of Carbon Dioxide (CO_2) into Fuels and Value-Added Products. *ACS Energy Lett.* **2020**, *5*, 486–519, doi:10.1021/acsenergylett.9b02585.

6. Ashik, K.P.; Sharma, R.S. A Review on Mechanical Properties of Natural Fiber Reinforced Hybrid Polymer Composites. *JMMCE* **2015**, *03*, 420–426, doi:10.4236/jmmce.2015.35044.
7. Tolêdo Filho, R.D.; Scrivener, K.; England, G.L.; Ghavami, K. Durability of Alkali-Sensitive Sisal and Coconut Fibres in Cement Mortar Composites. *Cement and Concrete Composites* **2000**, *22*, 127–143, doi:10.1016/S0958-9465(99)00039-6.
8. Mármol, G.; Savastano, H.; Monzó, J.M.; Borrachero, M.V.; Soriano, L.; Payá, J. Portland Cement, Gypsum and Fly Ash Binder Systems Characterization for Lignocellulosic Fiber-Cement. *Construction and Building Materials* **2016**, *124*, 208–218, doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.07.083.
9. Mármol, G.; Santos, S.F.; Savastano Jr., H.; Borrachero, M.V.; Monzó, J.; Payá, J. Mechanical and Physical Performance of Low Alkalinity Cementitious Composites Reinforced with Recycled Cellulosic Fibres Pulp from Cement Kraft Bags. *Industrial Crops and Products* **2013**, *49*, 422–427, doi:10.1016/j.indcrop.2013.04.051.
10. Ballesteros, J.E.M.; Mármol, G.; Filomeno, R.; Rodier, L.; Savastano, H.; Fiorelli, J. Synergic Effect of Fiber and Matrix Treatments for Vegetable Fiber Reinforced Cement of Improved Performance. *Construction and Building Materials* **2019**, *205*, 52–60, doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.02.007.
11. Cabral, M.R.; Nakanishi, E.Y.; Mármol, G.; Palacios, J.; Godbout, S.; Lagacé, R.; Savastano, H.; Fiorelli, J. Potential of Jerusalem Artichoke (Helianthus Tuberosus L.) Stalks to Produce Cement-Bonded Particleboards. *Industrial Crops and Products* **2018**, *122*, 214–222, doi:10.1016/j.indcrop.2018.05.054.
12. International Energy Agency *Technology Roadmap - Low-Carbon Transition in the Cement Industry*; 2018;
13. Gartner, E.; Hirao, H. A Review of Alternative Approaches to the Reduction of CO2 Emissions Associated with the Manufacture of the Binder Phase in Concrete. *Cement and Concrete Research* **2015**, *78*, 126–142, doi:10.1016/j.cemconres.2015.04.012.
14. Shand, M.A.; Al-Tabbaa, A.; Qian, J.; Mo, L.; Jin, F. *Magnesia Cements: From Formulation to Application*; Elsevier: Amsterdam, 2020; ISBN 978-0-12-391925-0.
15. Mármol, G.; Savastano, H. Study of the Degradation of Non-Conventional MgO-SiO2 Cement Reinforced with Lignocellulosic Fibers. *Cement and Concrete Composites* **2017**, *80*, 258–267, doi:10.1016/j.cemconcomp.2017.03.015.
16. Mármol, G.; Savastano Jr, H. High-Toughness M-S-H Cement Composites Reinforced with Cellulose Fibers through CO2 Curing. *Cement and Concrete Composites* **2022**, *134*, 104759, doi:10.1016/j.cemconcomp.2022.104759.
17. Gavioli, L.M.; Mármol, G.; Lima, C.G.; Teixeira, R.S.; Rossignolo, J.A. Comparative Performance of M-S-H Cement vs. Portland Cement in Fiber Cement Incorporating Bamboo Leaf Ash and Cellulosic Fibers. *Journal of Building Engineering* **2024**, *91*, 109644, doi:10.1016/j.jobe.2024.109644.
18. Capelo, A.R.; Mármol, G.; Rossignolo, J.A. Optimization of the Rice Husk Ash Production Process for the Manufacture of Magnesium Silicate Hydrate Cements. *Journal of Cleaner Production* **2023**, *425*, 138891, doi:10.1016/j.jclepro.2023.138891.
19. Mármol, G.; Miranda, R.; Fuente, E.; Blanco, M.A.; Negro, C. Water Management and Treatment for an Environmentally Friendly Closed Circuit Manufacture.; Cape Town, South Africa, October 2018.

A INTEGRAÇÃO DO GRAFENO NOS ÂNODOS E CÁTODOS DAS BATERIAS DE ÍON DE LÍTIO PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS: UMA REVISÃO

A GUIDE THE INTEGRATION OF GRAPHENE IN THE ANODES AND CATHODES OF LITHIUM-ION BATTERIES FOR ELECTRIC VEHICLES: A REVIEW

Laura Emiliana Delgado Noguera
Guibson Souza dos Santos**
Fernando Luiz Peixoto
Sheila Santisi Travessa
Alex Fabiano Bueno

RESUMO
À medida que a demanda por veículos elétricos (VEs) aumentam, em busca de alternativas sustentáveis, as baterias de íon-lítio com alta densidade energética tornamse cada vez mais essenciais em aplicações de energia renovável. Nesse contexto, o grafeno e os derivados do grafeno apresentam-se como materiais inovadores na evolução das baterias íon-lítio (LIBs), buscando aprimorar veículos elétricos com maior autonomia e eficiência energética.
No entanto, a utilização do grafeno em baterias comerciais enfrenta desafios, como segurança, sínteses a grande escala, custos e disponibilidade. Esta revisão analisa a integração do grafeno (e seus compósitos) nas baterias de íon de lítio, seu desenvolvimento e visando os desafios para impulsionar desempenho e as capacidades dessas baterias.
Palavras-chave: grafeno; veículos elétricos; compósitos.

ABSTRACT
As the demand for electric vehicles (EVs) increases in search of sustainable alternatives, lithium-ion batteries with high energy density are becoming increasingly essential in renewable energy applications. In this context, graphene and graphene derivatives have emerged as innovative materials in the evolution of lithium-ion batteries (LIBs), seeking to improve electric vehicles with greater autonomy and energy efficiency.
However, the use of graphene in commercial batteries faces challenges such as safety, large-scale synthesis, cost, and availability. This review analyzes the integration of

* Este artigo faz parte do projeto de pesquisa: Desenvolvimento de baterias de grafeno com capacidade de suportar cargas mecânicas para usá-las como componente estrutural em veículos elétricos: “Baterias Estruturais”
** Departamento de Engenharia, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Campus Blumenau, 89036-002 Blumenau, SC, Brasil. E-mail: laura.delgado@grad.ufsc.br
* Este artigo faz parte do projeto de pesquisa: Desenvolvimento de baterias de grafeno com capacidade de suportar cargas mecânicas para usá-las como componente estrutural em veículos elétricos: “Baterias Estruturais”
** Departamento de Engenharia, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Campus Blumenau, 89036002 Blumenau, SC, Brasil. E-mail: laura.delgado@grad.ufsc.br

graphene (and its composites) into lithium-ion batteries, its development, and the challenges it faces in boosting the performance and capabilities of these batteries. **Key words**: graphene; electric vehicles; composites

1 INTRODUÇÃO

A busca por soluções energéticas eficientes e sustentáveis ao longo da história, se reflete no desenvolvimento dos sistemas de armazenamento de energia. Com as mudanças climáticas, a sustentabilidade ambiental e a crescente preocupação por energia limpa e renovável estes desafios tornaram-se mais importantes.[1], [2]. Neste contexto, as baterias de íon-lítio (LIBs) surgem como protagonistas na evolução energética, desempenhando um papel essencial para a sustentabilidade energética através de sua aplicação em veículos elétricos [1], [2], [3]. No entanto, as baterias de íon-lítio (LIBs) enfrentam limitações e são necessárias inovações tanto nos materiais componentes utilizados na célula como na engenharia envolvida na fabricação das células para o desempenho ideal [4], [5].

Os compósitos contendo grafeno destacam-se como material promissor para superar essas limitações nas baterias íon-lítio para veículos elétricos (VEs) e veículos elétricos híbridos (VEH) [6], [7], [8]. O grafeno apresenta propriedades eletrônicas, de transporte, de condutividade térmica, químicas e eletroquímicas [8], [9] tornando-se ideal para aprimorar os eletrodos das baterias de íon-lítio, potencializando a eficiência do armazenamento e transferência de energia.[8], [9], [10], [11].

A implementação do grafeno em baterias de íon-lítio para veículos elétricos (VEs) e veículos elétricos híbridos (VEHs) ainda enfrenta desafios, incluindo a otimização da síntese do grafeno em escala industrial mantendo suas propriedades excepcionais [10], bem como a integração eficiente deste material nas LIBs existentes [10], [12].

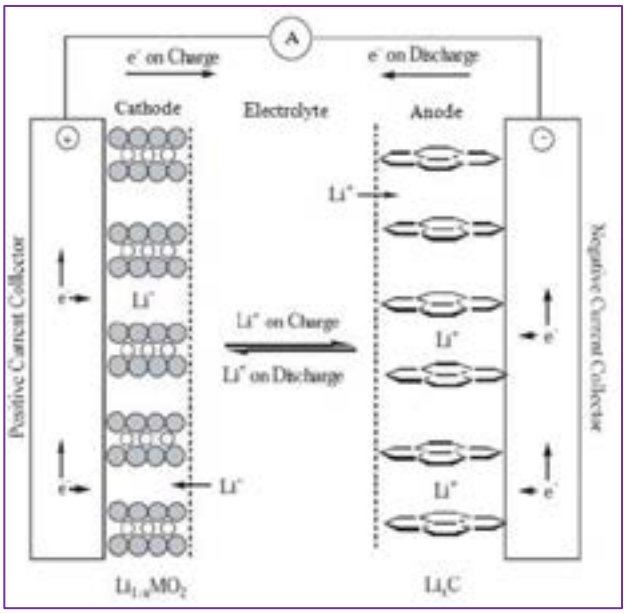
Esta revisão analisa o uso do grafeno como um material de eletrodo para baterias de íon-lítio e, também apresenta os desafios e limitações atuais da utilização do grafeno em aplicações de larga escala. Apesar de que o grafeno ofereça vantagens inquestionáveis, sua integração em baterias comerciais enfrenta obstáculos, incluindo síntese, processamento e desafios de custo [10].

2 GRAFENO APLICADO EM BATERIAS PARA VEICULOS ELÉTRICOS

O armazenamento de energia abrange todos os métodos disponíveis para conservar uma determinada quantidade de energia em qualquer forma, a fim de liberála quando for necessária [13]. Uma das características mais importantes é o tempo durante o qual é possível armazenar energia sem qualquer perda, uma vez que, na maioria dos casos, a energia armazenada se dissipa ao longo do tempo [13], [14]. Neste contexto, as baterias destacam-se pela capacidade de armazenamento de energia, pois geram e a armazena no mesmo dispositivo [7], [15].

Uma bateria é formada por células eletroquímicas. Cada célula possui um eletrodo positivo, um eletrodo negativo e um isolante que permite a passagem de íons, mas não de elétrons [16], [17]. A corrente elétrica passa por circuitos externos podendo alimentar um motor elétrico. As baterias para veículos elétricos (VEs) precisam ser recarregáveis, o que implica que as reações eletroquímicas nos eletrodos devem ser reversíveis ao longo de milhares de ciclos. A figura 1 ilustra os componentes básicos de uma bateria íon- lítio tradicional.

Figura 1 –Processo eletroquímico de células de íon-lítio



Fonte: Modificado de [17]

As baterias de íon-lítio (LIBs) são consideradas uma fonte promissora de armazenamento de energia para veículos elétricos (VEs) e veículos elétricos híbridos (VEHs), pois possui várias vantagens significativas sobre outros tipos de baterias [7], [8], [18]. As principais vantagens são a alta relação entre energia e peso, a ausência de efeito de memória e a baixa descarga automática [5], [15]. No entanto, o preço das baterias de íons-lítio ainda é elevado, e o custo pode se tornar ainda maior devido às limitações dos recursos de lítio, o principal fator que inibe a sua expansão para aplicações de energia renovável [15], [19]. Embora haja um debate contínuo sobre as reservas mundiais de lítio disponíveis [19], seu uso generalizado para baterias de veículos proporcionará o aumento dos custos da matéria-prima [15]. Assim, o desenvolvimento de eletrodos de alta densidade energética para baterias de íon de lítio (LIBs) é de fundamental importância para enfrentar os desafios das indústrias eletrônica e automobilística [4], [20], a fim de não só aprimorar as caraterísticas como também a diminuição de custos.

Portanto, são necessárias melhorias significativas nas baterias de íon-lítio (LIBs) em termos de densidade de energia e custo ao longo da produção da bateria [21], enquanto outros indicadores importantes de performance, como vida útil, segurança, capacidade de carregamento rápido e desempenho em diversas temperaturas, precisam ser aprimorados [7], [18]

Uma bateria típica de íon-lítio é composta essencialmente por cinco componentes principais: o cátodo (parte positiva), que é composta por um substrato revestido com o material ativo e o ânodo (parte negativa), que geralmente é composto por um substrato de cobre fino revestido com o material ativo do ânodo, entre essas duas partes se encontra o material separador que impede curtos-circuitos; um invólucro que contém os componentes; e, finalmente, um eletrólito que permite o fluxo de íons entre cátodo e ânodo [7]. As combinações químicas utilizadas nas baterias íon-lítio se referem a uma ampla variedade de produtos químicos diferentes [1], onde é possível uma combinação variada para obter características e desempenho muito diferentes [18], [21].

As nanoestruturas de Carbono ocupam um papel importante no desenvolvimento de novos materiais [22], [23], pois as LIBs apresentam desvantagens como custo elevado e a sobrecarga ou aquecimento acima de 100°C provocando a decomposição do cátodo e do eletrólito com liberação de gás [21]. O grafeno, uma forma alotrópica do carbono com uma estrutura bidimensional única, surgiu como um material de grande interesse para aprimorar o desempenho das baterias de íon-lítio [1],

destacando-se por suas propriedades elétricas, térmicas, mecânicas e eletroquímicas, essas características o tornam um candidato promissor para o desenvolvimento de novos eletrodos [8], [9].

A importância do grafeno como material de eletrodo para baterias de íon-lítio (LIBs) tem crescido consideravelmente, motivado por sua elevada área superficial, estabilidade química e excelente condutividade elétrica e térmica [1], [8]. Essas propriedades são particularmente importantes para serem aplicados, seja no cátodo ou no ânodo, contribuindo para a melhoria do desempenho das baterias [6], [24].

3. ÂNODOS A BASE DE GRAFENO

A natureza e as propriedades do material do ânodo são fundamentais para o desempenho geral da bateria, assim o desenvolvimento de materiais anódicos para baterias de íons de lítio (LIBs) tem evoluído significativamente ao longo dos anos. Os materiais do ânodo são necessários pois o lítio metálico forma dendritos que podem causar curtos-circuitos, iniciar uma reação de fuga térmica no cátodo e fazer com que a bateria se incendeie [19].

Os materiais anódicos das LIBs podem ser classificados em três tipos de acordo com o mecanismo de reação [6], [18], [24]:

1. Um tipo são os ânodos de intercalação, abrangendo materiais à base de carbono e óxido de lítio, estanho e titanato de lítio [25];
2. Materiais de liga, que formam ligas com elementos como lítio, silício, estanho, germânio etc.[26];
3. Materiais de conversão, estes materiais reagem com lítio para formar novos compostos, como sulfetos, óxidos, fosfetos, nitretos de metais de transição, fluoretos e selenetos [26]

Os mais utilizados em aplicações comerciais são os materiais de tipo intercalação à base de carbono, como *grafite*, *carbonos macios e duros, e microesferas de mesocarbono* [6], [19], [24]. No entanto, o grafite apresenta limitações significativas quando aplicado em LIBs para veículos elétricos (VEs) e veículos híbridos elétricos (VEHs), tais como baixa capacidade, capacidade de taxa limitada e rápida degradação da capacidade devido à sua expansão volumétrica e baixa condutividade elétrica [27],[8]. Para superar essas desvantagens, existem pesquisas para o uso de grafeno, nanocompósitos de grafeno e grafeno reduzido como anodo destas baterias.

Quando o grafeno é utilizado diretamente como material anódico o grafeno é propenso à agregação e não possui o benefício do armazenamento de lítio [28]. Por outro lado, os compósitos à base de grafeno, através de suas estruturas cuidadosamente projetadas, proporcionam desempenho eletroquímico superior como materiais anódicos para LIBs [29].

1.1 Ânodos tipo intercalação

Entre vários materiais anódicos para LIBs, o titanato de espinélio de lítio ($Li_4 Ti_5 O_{12}$, LTO) é considerado um candidato atraente com sua rápida capacidade de inserção e desinserção de Li^+, excelente reversibilidade do ciclo, alta segurança e tensão zero durante o carregamento e descarregamento [30]. Além disso, como o alto potencial de equilíbrio do par redox Ti^{4+}/Ti^{3+} está acima do potencial de redução dos solventes eletrolíticos comuns, um filme de interface eletrolítica sólida (SEI) causado pela redução do solvente não se forma durante o processo de carga e descarga. Todos esses méritos tornam o LTO mais competitivo como material anódico seguro para LIBs de alta potência [25].

Quando adicionado o grafeno como aditivo condutor para fabricar nanofibras de LTO incorporadas com grafeno, apresentam grande melhoria na condutividade da superfície, bem como na capacidade de taxa. O teor de grafeno foi de cerca de 1 wt.% no teor total de carbono de 7,2 wt.%, o que sugere que a adição de apenas uma pequena quantidade de grafeno poderia desempenhar um papel importante [26]. No entanto, vale a pena observar que a quantidade de grafeno adicionada não é uma questão de quanto

mais, melhor, pois pode afetar a eficiência colúmbica inicial dos materiais do eletrodo, um fator fundamental na aplicação prática das LIBs [30]. Com o aumento do conteúdo de grafeno, a perda de capacidade irreversível no primeiro ciclo aumenta, o que pode ser atribuído à formação de um filme SEI e à reação de grupos funcionais contendo oxigênio no grafeno com íons de lítio [25].
Por outro lado, quando é preparado um híbrido de n-LTO disperso em nanofolhas de grafeno para formar uma rede condutora bem conectada e reduzir a diferença entre os potenciais de platô de carga e descarga em todas as taxas. Verifica-se que o material híbrido apresenta capacidade de taxa e desempenho de ciclo significativamente melhores. A relação entre a eficiência colúmbica inicial e o conteúdo de grafeno no híbrido também é levada em consideração. Com um teor de grafeno de 5% em peso, o material híbrido apresenta excelente desempenho como material anódico em LIBs [30].

3.2 Ânodos tipo liga otimizado com grafeno

Os ânodos de liga são materiais anódicos promissores para baterias de íons de lítio, estes ânodos são capazes de receber vários íons de lítio por átomo durante o processo de litiação [8]

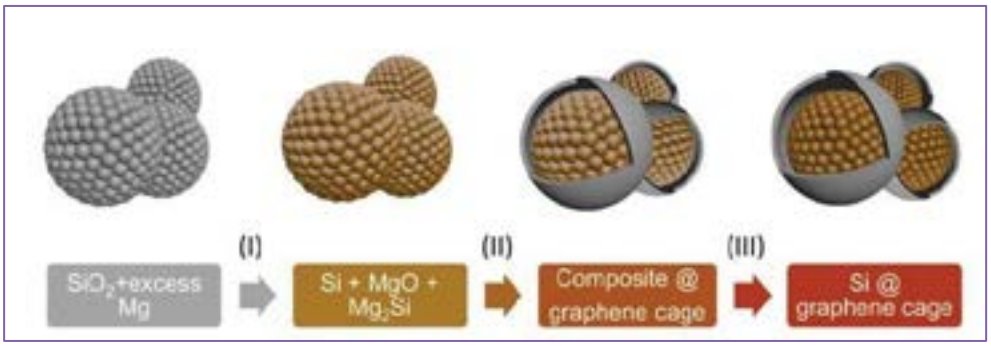
Estes elementos são os do Grupo IVA, e possuem altas capacidades teóricas, como o silício (3579 mAh.g $^{-1}$) [27], [32], estanho (994 mAh.g $^{-1}$) [32] e o germânio (16625 mA h.g $^{-1}$) [32]. No entanto, a enorme variação de volume durante o processo de litiação e delitiação leva a uma série de problemas, limitando assim severamente o uso desses novos materiais anódicos em aplicações práticas [32]. Por exemplo o silício possui baixa ciclabilidade pois existe uma perda de contato elétrico devido à destruição do eletrodo durante ciclos repetidos, resultante da grande mudança de volume de aproximadamente 280% [27], [32], [33], [34], e descargas e carregamentos repetidos podem causar a fratura mecânica das partículas de silicio [27]

Para solucionar os problemas, existem diversas pesquisas com o fim de aprimorar as propriedades eletroquímicas [32] como a adição de compósitos de carbono, grafeno e óxido de grafeno [8], [32]. No entanto, para atingir os valores práticos que tornam estes anodos aplicáveis a baterias de íon lítio destinados para EVs e HEVs, ainda é um desafio. O grafeno com suas propriedades excepcionais poderia superar vários problemas, como expansão de volume, baixa condutividade, capacidade de taxa e desvanecimento da capacidade dos materiais do eletrodo [34].

A integração do silício com o grafeno em vários projetos estruturais, como compósitos micro-nanoestruturados e nanopartículas core-shell, demonstrou aumentar significativamente a capacidade reversível e a estabilidade do ciclo dos ânodos [11], [35], [36]

Quando o silício é catalisado pelo óxido de magnésio, gaiolas de grafeno podem ser conformemente cultivadas sobre as partículas compostas, levando à formação de partículas ocas de silício encapsuladas em grafeno conforme mostrado na **figura 2**. Tais materiais apresentam excelentes propriedades de armazenamento de lítio em termos de alta capacidade específica, capacidade de taxa notável (890 mAh g^{-1} a 5 A g^{-1}) e boa retenção de ciclo ao longo de 200 ciclos, com uma eficiência coulombiana consistentemente alta a uma densidade de corrente de 1 A g^{-1}. Testes de bateria completa utilizando $LiCoO_2$ como cátodo demonstram uma alta densidade energética de 329 Wh kg^{-1}[37], [38]

Figura 2 – Ilustração esquemática das rotas sintéticas para o composto de gaiola de Si-grafeno



Fonte:[37]

Em outra pesquisa, folhas de grafeno verticais (VGSs) foram cultivadas em partículas de silício por deposição de vapor químico térmico [33], formando uma camada de superfície flexível e porosa, assim as partículas de sílico encapsuladas em VGSs (VGSs@Si) apresentam baixa deformação volumétrica (12,9% de espessura após 100 ciclos) e alto coeficiente de difusão de íons de lítio ($1{,}5\times10^{-12}$ e $4{,}4 \times 10^{-9}$ cm^2 /s), decorrentes da boa flexibilidade, alta porosidade e excelente condutividade elétrica das VGSs. Como ânodo ión-litio, em meias células, o VGSs@Si mostra uma capacidade de 1403,5 mAh/g em 500 ciclos com retenção de capacidade de 80,1% e capacidade de taxa proeminente (457,9 mAh/g a 20 A/g). Em células completas ânodo e $LiCoO_2$ comercial, obtém-se uma alta densidade de energia gravimétrica de 514,6 Wh/kg e uma densidade de energia volumétrica de 1.126,5 Wh/L [33]

3.3 Ânodos de conversão optimizados com grafeno

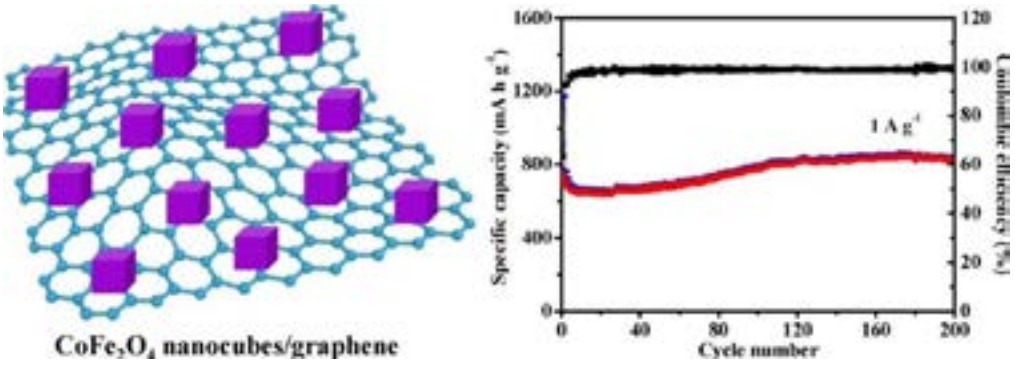
Os materiais de ânodo de conversão normalmente compreendem compostos com metais de transição, como Fe_xO_y, Mn_xO_y e Co_xO_y , que após a litiação se transformam em um metal elementar [6], [39]. Esses compostos servem de base para ânodos, que apresentam valência variável e grandes capacidades reversíveis (500 – 1000 $mAhg^{-1}$) devido ao envolvimento de vários elétrons nas reações. Esses materiais de conversão das reações, no entanto, compartilham alguns dos mesmos problemas dos eletrodos de liga, incluindo baixa condutividade iônica e elétrica , expansão significativa da capacidade e rachaduras do eletrodo durante o estágio de ciclagem, pulverização de partículas durante os ciclos de carga e descarga. [6], [40].

Nos materiais anódicos de conversão, os materiais de grafeno foram introduzidos principalmente para inibir a agregação, acomodar a variação de volume e proporcionar excelente condutividade elétrica [6], [8], [11].

O grafeno, quando combinado com óxidos ou sulfetos metálicos, forma nanocompósitos que exibem efeitos sinérgicos, levando a um melhor desempenho eletroquímico para ânodos das LIBs [34].

$CoFe_2O_4$, um óxido de metal de transição binário representativo, é um candidato promissor devido à sua grande capacidade teórica (916 mAh g^{-1}) e alta estabilidade térmica e química [40], para aprimorar este eletrodo com vários materiais de carbono, entre os quais quando é utilizado um método hidrotérmico *in situ* para construir $CoFe_2O_4$ nanocúbico com um comprimento de borda de cerca de 5 – 15 nm presos em nanofolhas de grafeno, promove o transporte interfacial de elétrons e íons, e mantém a integridade estrutural geral do eletrodo $CoFe_2O_4$ /G durante a ciclagem. Beneficiando-se dessas características notáveis, o eletrodo $CoFe_2O_4$ /G exibe excelente desempenho de ciclagem (1109 mAh h g^{-1} após 100 ciclos a 0,2 A g^{-1} e 835 mAh h g^{-1} após 200 ciclos a 1 Ag^{-1}) e excelente capacidade de taxa
(420 mAh hg^{-1} a 5 Ag^{-1}) [40]

Figura X – Desempenho do eletrodo de $CoFe_2O_4$/G



Fonte:[40]

4. CÁTODOS A BASE DE GRAFENO

Nas baterias de íons-lítio (LIBs), os materiais catódicos desempenham um papel crucial determinando a capacidade, a estabilidade e a eficiência das baterias [41].

A maioria dos materiais catódicos comercializados de baterias de íon-litio (LIBs) são compostos por óxidos metálicos em camadas, como o óxido de lítio-cobalto (LCO), óxido de lítio-níquel ($LiNiO_2$ ou LNO), e óxido de níquel-manganês-cobalto (NMC), fosfatos de metais de transição como o fosfato de ferro-lítio (LFP) e o fosfato de vanádio-lítio (LVP), e o espinélio óxido de lítio-manganês (LMO) [7], [8], [21], [42], [43]. Atualmente, cerca de 65-70% dos veículos elétricos utilizam cátodo NMC, NCA representa cerca de 15-20% em 2020, enquanto o LFP representa outros 10-20% dos VE. [44]

Estes materiais catódicos possuem coeficientes de difusão de íons de lítio adequados; porém, a baixa condutividade iônica e eletrônica, grande decaimento de capacidade reversível e baixa estabilidade afeta a capacidade de carga e descarga rápida das baterias [42].

Na Tabela 1, observa-se os tipos de cátodos utilizados para as LIBs, onde o cátodo de fosfato de lítio e ferro (LFP) apresenta a temperatura mais alta acima da qual ocorre fuga térmica e suporta o maior número de ciclos antes da degradação, medida pela perda de capacidade [41].

Tabela 1 – Desempenho dos catodos tradicionalmente utilizados nas baterias íon lítio.

Tipo de Cátodo	Fórmula geral)	Capacidade Experimental	Fuga Térmica	Ciclo de Vida (em (n^0 de ciclos)
Óxido de Li Cobalto (LCO)	$LiCoO_2$	150	150	500-1000
Óxido de Li Manganês (LMO) Li	$LiMn_2O_4$	120-130	250	300-700
Níquel Manganês Oxido de cobalto (NMC)	$LiNi_xMn_yCzO_2$	150	210	1000-2000
Li Niquel cobalto Oxido de alumínio (NCA)	$LiNi_xCo_yAl_zCO_2$	175	150	500
Fosfato de Li- Ferro (LFP)	LiFePO4	160-170	270	> 2000

Fonte: [41]

Espera-se que desenvolvimentos significativos no desempenho da bateria e reduções de custos venham de novos produtos químicos de bateria baseados em diferentes configurações nos níveis de célula e sistema, bem como em diferentes mecanismos de armazenamento no nível do material [45]a integração do grafeno e de

materiais baseados em grafeno nos cátodos de LIBs surge como uma solução promissora para superar diversas limitações [28]. Quando incorporado aos materiais catódicos de LIBs, o grafeno pode significativamente melhorar a condutividade elétrica, facilitando uma transferência mais eficiente de elétrons e íons de lítio durante os processos de carga e descarga [1], [8]. Além disso, a alta área superficial do grafeno pode proporcionar mais sítios ativos para a intercalação de íons de lítio, aumentando a capacidade e a eficiência energética das baterias [45].

4.1 Fosfato de ferro e lítio (LiFePO4 , LFP)

O fosfato de ferro e lítio (LFP) possui uma estrutura de cristal de tipo olivina [17], [43] que determina que sua deformação da rede cristalina seja menor no processo de descarga elétrica, sua estrutura é estável e segura, assim, sua vida útil é extremamente longa [7], [44]. Essas características também podem fazer com que a LFP resista à oxidação e ao ambiente ácido, a bateria tem mais opções de eletrólitos e o desempenho da bateria também pode ser otimizado [17].

Os fosfatos são extremamente estáveis em condições de sobrecarga ou curtocircuito e têm a capacidade de resistir a altas temperaturas sem se decompor [7], [17]. Portanto, LFP cobre uma faixa maior de temperatura operacional entre -30 °C e 60 °C e de temperatura de armazenamento entre -50 °C e 60 °C [46]. LFP exibe uma tensão de par redox igual a 4,1 V e energia específica de 580 $Whkg^{-1}$ [43]. A capacidade específica teórica do $LiFePO_4$ é de 170 mAh/g e, na prática, pode atingir >90% do seu valor teórico. Seu ciclo de vida é mais de 1.500 vezes. Embora tenha uma tensão operacional mais baixa (3,4 V vs. Li/Li^{+}) e densidade de energia que o óxido de lítiocobalto ($LiCoO_2$) [47], o LFP é uma das combinações mais comuns em aplicações em sistemas híbridos automotivos, veículos elétricos híbridos plug-in, ferramentas elétricas, e produtos de aviação devido à sua capacidade de alta potência e custo relativamente baixo. Isso significa que a bateria pode aceitar uma carga de frenagem regenerativa e fornecer uma descarga de aceleração muito rapidamente. [7], [43] também baixa taxa de autodescarga e tolerância a altas temperaturas [43].

Por outra parte, a cinética de difusão de elétrons/Li^{+} é intrinsecamente pior do que os demais tipos de cátodos citados, e as baterias comerciais baseadas em $LiFePO_4$ dependem da síntese de pequenas partículas revestidas com carbono. As pesquisas de [41], envolve a otimização do revestimento de carbono, pois as baterias de íons-lítio baseadas de fosfato de ferro e lítio não só fornecem a capacidade necessária e têm uma vida útil de milhares de ciclos, mas também aumentam a segurança durante o carregamento. Isso é importante para os VEs, onde as questões de segurança e a capacidade de potência são mais importantes do que a capacidade de energia [43]. A utilização de $LiFePO_4$ provoca apenas uma variação de volume de 6,81% no processo de inserção e extração de lítio que garante boa estabilidade estrutural e excelente reversibilidade do ciclo [43].

A abundância natural de $LiFePO_4$, mineral trifilita, reduz o custo final do produto. No entanto, baixa condutividade iônica e eletrônica (10^{-10} Scm^{-1} e 10^{-8} Scm^{-1} respectivamente), fácil bloqueio de canais unidimensionais para difusão de íons de lítio por defeitos e impurezas, e lenta difusão de lítio na direção são suas principais desvantagens. A desintercalação do lítio é um desafio devido ao modesto estiramento e distorção dessa estrutura cristalina densa, que resulta em baixa condutividade. Seu coeficiente de difusão para íons de lítio é $1,8 \times 10^{-14}$, e sua difusividade é $10^{-14} – 10^{-16}$ $cm^2 s^{-1}$, respectivamente. [43]

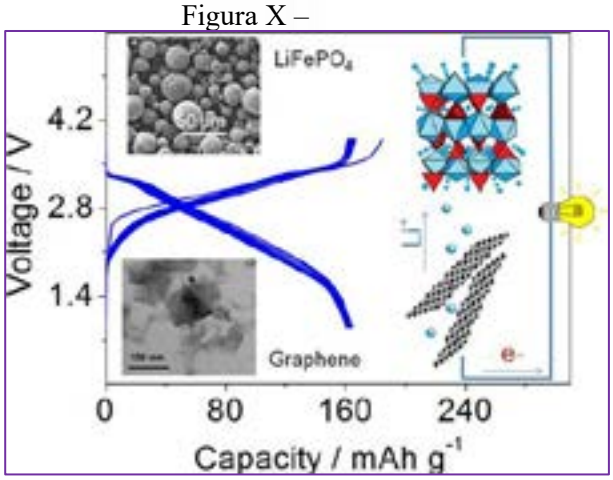
Como os canais de difusão de íons de lítio dentro das partículas LFP são canais unidimensionais, a obstrução é frequentemente causada pelas falhas [6], [43].

A adição de grafeno ao LFP pode também melhorar a estabilidade estrutural dos materiais durante os ciclos de carga e descarga, prolongando a vida útil da bateria. No entanto, o grafeno puro com folha de carbono hexagonal perfeita possui alta barreira de

energia para a difusão do lítio através do plano basal do grafeno e baixa energia de ligação ao lítio [6], [8], o que poderia causar aglomeração de lítio na superfície do grafeno (SEI); esses obstáculos limitariam as características de armazenamento de lítio do grafeno [48].

Neste contexto, pesquisadores adicionaram espuma de grafeno para melhorar o desempenho do cátodo, onde a espuma de grafeno foi sintetizada por deposição de vapor químico (CVD). O eletrodo do cátodo foi preparado com a aplicação de LFP na espuma de grafeno [49]. A espuma de grafeno apresenta propriedades excepcionais, como grande área de superfície e ótima condutividade elétrica. Quando LFP é colocado entre o ânodo e a espuma a capacidade específica da (LFP/GF) alcança de 23,1 $mAh{\cdot}g^{1}$ a uma taxa de descarga de 3C, significativamente superior à configuração oposta (GF/LFP) de 112,6 $mAh{\cdot}g^{-1}$ sob as mesmas condições. Além disso os coeficientes de difusão de Li^{+} da GF/LFP foram 9,1 vezes maiores do que os da LFP/GF. O aumento em alta densidade de corrente devido à alta taxa de transferência de íons é proporcionada pela espuma de grafeno [49].

Figura X –



Fonte:[50]

Quando é adicionado um ânodo de nanoflocos de grafeno suportado por cobre e um cátodo LFP. A bateria demonstra que pode operar por mais de 80 ciclos a uma taxa de 1C, com eficiência coulombiana próxima a 100% e densidade de energia teórica de 380 Wh kg^{-1}. O uso de ânodos ultraleves de nanofios de grafeno estima uma densidade de energia prática de cerca de 190 Wh kg^{-1}, superando a tecnologia atual de baterias de íons de lítio em aproximadamente 25-60%. Embora a otimização para implicações industriais exija mais trabalho, as amplas possibilidades de melhoria sugerem um impacto significativo nas soluções tecnológicas para baterias de íon de lítio e em outros dispositivos de armazenamento de energia [50].

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O grafeno e seus compósitos representam materiais promissores na evolução das baterias de íon-lítio, oferecendo o potencial de transformar significativamente o mercado de veículos elétricos e outras aplicações de energia renovável. No entanto, é fundamental abordar os desafios existentes por meio de pesquisa e inovação contínuas, visando alcançar um futuro mais sustentável e eficiente em termos energéticos.

Às propriedades únicas do grafeno como alta condutividade elétrica e capacidade de armazenamento de energia, tem o potencial de melhorar significativamente a eficiência das baterias de íon-lítio. Essa integração pode resultar em baterias mais leves, duráveis, que carregam mais rapidamente e possuem maior autonomia.

Portanto a nossa pesquisa está em andamento, e espera-se que o grafeno desempenhe um papel fundamental no avanço da tecnologia de baterias para a próxima geração veículos elétricos.

REFERÊNCIAS

[1] O. Okhay and A. Tkach, "A comprehensive review of the use of porous graphene frameworks for various types of rechargeable lithium batteries," *J Energy Storage*, vol. 80, p. 110336, Mar. 2024, doi: 10.1016/J.EST.2023.110336.

[2] A. R. Quinteros-Condoretty, S. R. Golroudbary, L. Albareda, B. Barbiellini, and A. Soyer, "Impact of circular design of lithium-ion batteries on supply of lithium for electric cars towards a sustainable mobility and energy transition," *Procedia CIRP*, vol. 100, pp. 73–78, 2021, doi: 10.1016/j.procir.2021.05.012.

[3] G. Zubi, R. Dufo-López, M. Carvalho, and G. Pasaoglu, "The lithium-ion battery: State of the art and future perspectives," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 89, pp. 292–308, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.03.002.

[4] A. Manthiram, "An Outlook on Lithium Ion Battery Technology," *ACS Cent Sci*, vol. 3, no. 10, pp. 1063–1069, Oct. 2017, doi: 10.1021/acscentsci.7b00288.

[5] Y. Chen *et al.*, "A review of lithium-ion battery safety concerns: The issues, strategies, and testing standards," *Journal of Energy Chemistry*, vol. 59, pp. 83–99, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.jechem.2020.10.017.

[6] L. Syam Sundar, M. Amin Mir, M. Waqar Ashraf, and F. Djavanroodi, "Synthesis and characterization of graphene and its composites for Lithium-Ion battery applications: A comprehensive review," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 78, pp. 224–245, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.aej.2023.07.044.

[7] J. (John T.) Warner, *The handbook of lithium-ion battery pack design : chemistry, components, types and terminology*. 2015.

[8] N. Mahmood, C. Zhang, H. Yin, and Y. Hou, "Graphene-based nanocomposites for energy storage and conversion in lithium batteries, supercapacitors and fuel cells," *J. Mater. Chem. A*, vol. 2, no. 1, pp. 15–32, 2014, doi: 10.1039/C3TA13033A.

[9] A. G. Vieira, R. M. Moraes, F. M. de Vasconcelos, and D. W. Maia, "Investigação das propriedades eletrônicas de nanofitas de Grafeno e de Nitreto de Boro utilizando o modelo Tight-Binding," *Revista Brasileira de Ensino de Física*, vol. 45, 2023, doi: 10.1590/1806-9126-rbef-2023-0148.

[10] S. Wu *et al.*, "Graphene-Containing Nanomaterials for Lithium-Ion Batteries," *Adv Energy Mater*, vol. 5, no. 21, Nov. 2015, doi: 10.1002/aenm.201500400.

[11] M. R. Al Hassan, A. Sen, T. Zaman, and M. S. Mostari, “Emergence of graphene as a promising anode material for rechargeable batteries: a review,” *Mater Today Chem*, vol. 11, pp. 225–243, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.mtchem.2018.11.006.

[12] H. Cheng, J. G. Shapter, Y. Li, and G. Gao, “Recent progress of advanced anode materials of lithium-ion batteries,” *Journal of Energy Chemistry*, vol. 57, pp. 451–468, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.jechem.2020.08.056.

[13] M. Aneke and M. Wang, “Energy storage technologies and real life applications – A state of the art review,” *Appl Energy*, vol. 179, pp. 350–377, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.06.097.

[14] M. Tomasov, M. Kajanova, P. Bracinik, and D. Motyka, “Overview of Battery Models for Sustainable Power and Transport Applications,” *Transportation Research Procedia*, vol. 40, pp. 548–555, 2019, doi: 10.1016/j.trpro.2019.07.079.

[15] S. Vazquez, S. M. Lukic, E. Galvan, L. G. Franquelo, and J. M. Carrasco, “Energy Storage Systems for Transport and Grid Applications,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 12, pp. 3881–3895, Dec. 2010, doi: 10.1109/TIE.2010.2076414.

[16] E. J. Cairns and P. Albertus, “Batteries for Electric and Hybrid-Electric Vehicles,” *Annu Rev Chem Biomol Eng*, vol. 1, no. 1, pp. 299–320, Jun. 2010, doi: 10.1146/annurev-chembioeng-073009-100942.

[17] X. Chen, W. Shen, T. T. Vo, Z. Cao, and A. Kapoor, “An overview of lithiumion batteries for electric vehicles,” in *2012 10th International Power & Energy Conference (IPEC)*, IEEE, Nov. 2012, pp. 230–235. doi: 10.1109/ASSCC.2012.6523269.

[18] R. Schmuch, R. Wagner, G. Hörpel, T. Placke, and M. Winter, “Performance and cost of materials for lithium-based rechargeable automotive batteries,” *Nat Energy*, vol. 3, no. 4, pp. 267–278, Apr. 2018, doi: 10.1038/s41560-018-0107-2.

[19] N. Nitta, F. Wu, J. T. Lee, and G. Yushin, “Li-ion battery materials: present and future,” *Materials Today*, vol. 18, no. 5, pp. 252–264, Jun. 2015, doi: 10.1016/J.MATTOD.2014.10.040.

[20] S. Yu, S. H. Lee, D. J. Lee, Y. Sung, and T. Hyeon, “Conversion Reaction-Based Oxide Nanomaterials for Lithium Ion Battery Anodes,” *Small*, vol. 12, no. 16, pp. 2146–2172, Apr. 2016, doi: 10.1002/smll.201502299.

[21] S. Sharma, A. K. Panwar, and M. M. Tripathi, “Storage technologies for electric vehicles,” *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, vol. 7, no. 3, pp. 340–361, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.jtte.2020.04.004.

[22] R. Raccichini, A. Varzi, S. Passerini, and B. Scrosati, “The role of graphene for electrochemical energy storage,” *Nat Mater*, vol. 14, no. 3, pp. 271–279, Mar. 2015, doi: 10.1038/nmat4170.

[23] M. Liang and L. Zhi, “Graphene-based electrode materials for rechargeable lithium batteries,” *J Mater Chem*, vol. 19, no. 33, p. 5871, 2009, doi: 10.1039/b901551e.

[24] X. Cai, L. Lai, Z. Shen, and J. Lin, “Graphene and graphene-based composites as Li-ion battery electrode materials and their application in full cells,” *J Mater Chem A Mater*, vol. 5, no. 30, pp. 15423–15446, 2017, doi: 10.1039/C7TA04354F.

[25] Md. H. Hossain, M. A. Chowdhury, N. Hossain, Md. A. Islam, and M. H. Mobarak, “Advances of lithium-ion batteries anode materials—A review,” *Chemical Engineering Journal Advances*, vol. 16, p. 100569, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.ceja.2023.100569.

[26] P. U. Nzereogu, A. D. Omah, F. I. Ezema, E. I. Iwuoha, and A. C. Nwanya, “Anode materials for lithium-ion batteries: A review,” *Applied Surface Science Advances*, vol. 9, p. 100233, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.apsadv.2022.100233.

[27] Z. Feng *et al.*, “Review of silicon-based alloys for lithium-ion battery anodes,” *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, vol. 28, no. 10, pp. 1549–1564, Oct. 2021, doi: 10.1007/s12613-021-2335-x.

[28] Z. Liu, Y. Tian, P. Wang, and G. Zhang, “Applications of graphenebased composites in the anode of lithium-ion batteries,” *Frontiers in Nanotechnology*, vol. 4, Sep. 2022, doi: 10.3389/fnano.2022.952200.

[29] J. Bi *et al.*, “On the Road to the Frontiers of Lithium-Ion Batteries: A Review and Outlook of Graphene Anodes,” *Advanced Materials*, vol. 35, no. 16, Apr. 2023, doi: 10.1002/adma.202210734.

[30] Y. Shi, L. Wen, F. Li, and H.-M. Cheng, “Nanosized Li4Ti5O12/graphene hybrid materials with low polarization for high rate lithium ion batteries,” *J Power Sources*, vol. 196, no. 20, pp. 8610–8617, Oct. 2011, doi: 10.1016/j.jpowsour.2011.06.002.

[31] C. Julien, A. Mauger, A. Vijh, and K. Zaghib, “Anodes for Li-Ion Batteries,” in *Lithium Batteries*, Cham: Springer International Publishing, 2016, pp. 323–429. doi: 10.1007/978-3-319-19108-9_10.

[32] D. Liu *et al.*, “Group IVA Element (Si, Ge, Sn)-Based Alloying/Dealloying Anodes as Negative Electrodes for Full-Cell Lithium-Ion Batteries,” *Small*, vol. 13, no. 45, Dec. 2017, doi: 10.1002/smll.201702000.

[33] M. Han, Z. Lin, X. Ji, Y. Mu, J. Li, and J. Yu, "Growth of flexible and porous surface layers of vertical graphene sheets for accommodating huge volume change of silicon in lithium-ion battery anodes," *Mater Today Energy*, vol. 17, p. 100445, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.mtener.2020.100445.

[34] J. Zhao *et al.*, "Air-stable and freestanding lithium alloy/graphene foil as an alternative to lithium metal anodes," *Nat Nanotechnol*, vol. 12, no. 10, pp. 993–999, Oct. 2017, doi: 10.1038/nnano.2017.129.

[35] N. Lin, T. Xu, T. Li, Y. Han, and Y. Qian, "Controllable Self-Assembly of Micro-Nanostructured Si-Embedded Graphite/Graphene Composite Anode for High-Performance Li-Ion Batteries," *ACS Appl Mater Interfaces*, vol. 9, no. 45, pp. 39318–39325, Nov. 2017, doi: 10.1021/acsami.7b10639.

[36] J. Xu *et al.*, "Spheres of Graphene and Carbon Nanotubes Embedding Silicon as Mechanically Resilient Anodes for Lithium-Ion Batteries," *Nano Lett*, vol. 22, no. 7, pp. 3054–3061, Apr. 2022, doi: 10.1021/acs.nanolett.2c00341.

[37] P. Nie *et al.*, "Graphene Caging Silicon Particles for High-Performance LithiumIon Batteries," *Small*, vol. 14, no. 25, Jun. 2018, doi: 10.1002/smll.201800635.

[38] A. Jamaluddin, B. Umesh, F. Chen, J.-K. Chang, and C.-Y. Su, "Facile synthesis of core–shell structured Si@graphene balls as a high-performance anode for lithium-ion batteries," *Nanoscale*, vol. 12, no. 17, pp. 9616–9627, 2020, doi: 10.1039/D0NR01346C.

[39] V. B. Mbayachi, E. Ndayiragije, T. Sammani, S. Taj, E. R. Mbuta, and A. ullah khan, "Graphene synthesis, characterization and its applications: A review," *Results Chem*, vol. 3, p. 100163, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.rechem.2021.100163.

[40] Z. Yang, Y. Huang, J. Hu, L. Xiong, H. Luo, and Y. Wan, "Nanocubic CoFe2O4/graphene composite for superior lithium-ion battery anodes," *Synth Met*, vol. 242, pp. 92–98, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.synthmet.2018.05.010.

[41] R. M. Salgado, F. Danzi, J. E. Oliveira, A. El-Azab, P. P. Camanho, and M. H. Braga, "The Latest Trends in Electric Vehicles Batteries," *Molecules*, vol. 26, no. 11, p. 3188, May 2021, doi: 10.3390/molecules26113188.

[42] Z. Ye, "Performance of Lithium Ion Battery with Graphene Microstructure in Cathode," *J Phys Conf Ser*, vol. 2378, no. 1, p. 012030, Dec. 2022, doi: 10.1088/1742-6596/2378/1/012030.

[43] S. Awasthi *et al.*, "Progress in doping and crystal deformation for polyanions cathode based lithium-ion batteries," *Nano Materials Science*, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.nanoms.2024.01.004.

[44] H. Walvekar, H. Beltran, S. Sripad, and M. Pecht, "Implications of the Electric Vehicle Manufacturers' Decision to Mass Adopt Lithium-Iron Phosphate Batteries," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 63834–63843, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3182726.

[45] A. Ali, F. Liang, J. Zhu, and P. K. Shen, "The role of graphene in rechargeable lithium batteries: Synthesis, functionalisation, and perspectives," *Nano Materials Science*, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.nanoms.2022.07.004.

[46] J. Wang, Z. Sun, and X. Wei, "Performance and characteristic research in LiFePO4 battery for electric vehicle applications," in *2009 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, IEEE, Sep. 2009, pp. 1657–1661. doi: 10.1109/VPPC.2009.5289664.

[47] S.-Y. Chung, J. T. Bloking, and Y.-M. Chiang, "Electronically conductive phospho-olivines as lithium storage electrodes," *Nat Mater*, vol. 1, no. 2, pp. 123–128, Oct. 2002, doi: 10.1038/nmat732.

[48] Z. Ju, S. Zhang, Z. Xing, Q. Zhuang, Y. Qiang, and Y. Qian, "Direct Synthesis of Few-Layer F-Doped Graphene Foam and Its Lithium/Potassium Storage Properties," *ACS Appl Mater Interfaces*, vol. 8, no. 32, pp. 20682– 20690, Aug. 2016, doi: 10.1021/acsami.6b04763.

[49] P. KOKMAT, P. MATSAYAMAT, K. WONGRACH, P. SURINLERT, and A. RUAMMAITREE, "Improvement of specific capacity of lithium iron phosphate battery by increasing the surface area and electrical conductivity of cathode electrode using graphene foam," *Journal of Metals, Materials and Minerals*, vol. 33, no. 4, p. 1779, Oct. 2023, doi: 10.55713/jmmm.v33i4.1779.

[50] J. Hassoun *et al.*, "An Advanced Lithium-Ion Battery Based on a Graphene Anode and a Lithium Iron Phosphate Cathode," *Nano Lett*, vol. 14, no. 8, pp. 4901–4906, Aug. 2014, doi: 10.1021/nl502429m.

44º SENAFOR

28ª Conferência Internacional de Forjamento - Brasil
14ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas / 11º Congresso do BrDDRG
14ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis
3ª Conferência Internacional de Inovação em Materiais e Manufatura
Porto Alegre, RS, dias 1, 2 e 3 de outubro de 2025
www.senafor.com

USE OF GRAPHENE OXIDE AS A MODIFIER IN LITHIUM-ION BATTERY SEPARATORS

Heldiane S. dos Santos [1]
Thuany Maraschin [2]
Giovanna Gabriela Ghilardi [3]
Marçal José Rodrigues Pires [4]

ABSTRACT

High-energy-density batteries will be increasingly used in electric vehicles and other portable devices, as they are energy storage devices that require greater capacity and lower weight and volume of their components. One of the main components of the battery is the separator, which provides a physical barrier between the positive and negative electrodes, with the aim of preventing an electrical short circuit. The separator also serves as an electrolyte reservoir for transporting ions during a battery's charge and discharge cycles. In abnormal circumstances, such as overcharging or dropping, batteries can generate a large amount of heat and damage the separator, resulting in a potentially dangerous short circuit due to immediate contact between the cathode and anode. For these reasons, the separator has attracted special attention due to the associated safety risks. The most commonly used separators are microporous polypropylene (PP) and polyethylene (PE) membranes, but they have low affinity with the electrolytes used. Modifying the surface of these separators is an alternative to improve electrolyte absorption, contraction temperature, and the electrochemical performance of the battery. The objective of this work was to evaluate the performance of a commercial separator after modifying its surface by coating it with graphene oxide (GO). The modification of commercial Celgard® 2400 separators was performed by vacuum filtration with GO suspension (0.7 g L^{-1}) in isopropyl alcohol. To increase the adhesion of GO to the separators, a 0.67% PVDF solution was added to the GO suspension. To promote the adhesion of GO to the separator, two sensitization methods were established: sensitization by UV light (UVA, UVB/UVC) and cold plasma. The average GO loading on the separators was 0.300 mg cm^{-2}, with an average thickness of 30 µm. The results showed that the separator with OG has better wettability with the $LiPF_6$ electrolyte (smaller contact angle) than the unmodified commercial separator. The use of PVDF as a binder solution improved the distribution and homogeneity of the OG, indicating that PVDF facilitated the adhesion of the OG layer to the separator. Impedance measurements (EIS) showed an increase in lithium ionic conductivity after sensitization treatment and OG deposition on the commercial separator, indicating the viability of this process in the production of more safe and better performing separators.

[1] Dra. Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul, Brazil, heldianedossantos@gmail.com
[2] Dra. Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul, Brazil,
[3] Rio Grande do Sul State University, UERGS, Brazil.
[4] Prof. Dr. Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul, Brazil.

Key words*:* PVDF; graphene oxide, coating, security.

UTILIZAÇÃO DE ÓXIDO DE GRAFENO COMO MODIFICADOR EM SEPARADORES DE BATERIAS DE ÍON LÍTIO

Heldiane S. dos Santos (1)
Thuany Maraschin (2)
Giovanna Gabriela Ghilardi (3)
Marçal José Rodrigues Pires (4)

Escola Politécnica, PGETEMA PUCRS

Resumo

As baterias de alta energia específica serão cada vez mais utilizadas em veículos elétricos e outros dispositivos portáteis, sendo acumuladores de energia, que requerem maior capacidade e menores peso e volume de seus componentes. Um dos principais componentes da bateria é o separador que proporciona uma barreira física entre os eletrodos positivo e negativo, tendo como objetivo evitar um curto-circuito elétrico. O separador serve também como reservatório de eletrólito para o transporte de íons durante os ciclos de carga e descarga de uma bateria. Em circunstâncias anormais, como sobrecarga ou quedas, as baterias podem gerar uma grande quantidade de calor e danificar o separador, resultando num curto-circuito potencialmente perigoso devido ao contato imediato entre o cátodo e o ânodo. Devido a esses motivos, o separador tem atraído atenção especial, em função dos riscos de segurança associados. Os separadores mais utilizados são membranas microporosas de polipropileno (PP) e de polietileno (PE), porém apresentam baixa afinidade com os eletrólitos utilizados. A modificação da superfície desses separadores é alternativa para melhor a absorção de eletrólito, a temperatura de contração e o desempenho eletroquímico da bateria. O objetivo desse trabalho foi avaliar o desempenho de separador comercial após modificação de sua superfície por recobrimento com óxido de grafeno (OG). A modificação dos separadores comerciais Celgard® 2400 foi realizada por filtração à vácuo com suspensão de OG (0,7 g L^{-1}) em álcool isopropílico. Para aumentar a aderência do OG nos separadores, utilizou-se solução de PVDF 0,67%, adicionados à suspensão de OG. Para favorecer a adesão do OG no separador, estabeleceu-se dois métodos de sensibilização: sensibilização por luz UV (UVA, UVB/UVC) e plasma frio. O carregamento médio de OG nos separadores foi de 0,300 mg cm^{-2}, com espessura média de 30 µm. Os resultados demonstraram que o separador com OG apresenta melhor molhabilidade com o eletrólito $LiPF_6$ (menor ângulo de contato) do que o separador comercial não modificado. A utilização de PVDF como solução aglutinante melhorou a distribuição e homogeneidade do OG, indicando que o PVDF favorece a adesão da camada de OG no separador. As medidas de impedância (EIS) mostraram um aumento da condutividade iônica do lítio após o tratamento de sensibilização e a deposição de OG no separador comercial, indicando a viabilidade desse processo na produção de separadores mais seguros e com melhor desempenho.

Palavras-chave: PVDF, óxido de grafeno, recobrimento, segurança.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente a utilização de baterias de alta energia tem aumentado cada vez mais devido ao aumento do uso de veículos elétricos e muitos outros dispositivos portáteis como computadores, celulares, fontes de energia estacionárias, entre outros. Um dos principais componentes da bateria é o separador que proporciona uma barreira física entre os eletrodos positivo e negativo, tendo como objetivo evitar um curto-circuito elétrico [1], [2]. O separador serve também como reservatório de eletrólito para o transporte de íons durante os ciclos de carga e descarga de uma bateria, por esse motivo, tem atraído atenção especial, em função dos riscos de segurança associados.

Os separadores mais utilizados são membranas microporosas de polipropileno (PP) e de polietileno (PE) com uma espessura aproximada de aproximada de 5-30 µm [2]. Em circunstâncias anormais, como sobrecarga e quedas, as baterias podem gerar uma grande quantidade de calor e derreter o separador, resultando num curto-circuito potencialmente perigoso devido ao contato imediato entre o cátodo e o ânodo. Além disso, os separadores comerciais têm baixa molhabilidade superficial no eletrólito [3]. A fim de melhorar o desempenho destes separadores, a modificação de sua superfície com óxido de grafeno (OG) é uma alternativa, pois promove melhoria significativa na absorção de eletrólito (molhabilidade), ângulo de contato, temperatura de contração e desempenho eletroquímico da bateria.

O objetivo deste trabalho foi otimizar o processo de recobrimento de óxido de grafeno (OG) sobre membrana comercial (Celgard® 2400) usada como separador de baterias de íon lítio. Foram avaliados diferentes processos de modificação de superfície da membrana (sensibilização por luz UV (UVA, UVB/UVC) e plasma frio). As membranas antes e após tratamento foram caracterizadas por diversas técnicas.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para este experimento, a suspensão de OG [4] foi colocada no ultrassom por 2 horas para maior dispersão do óxido de grafeno [5] e após 10 mL da suspensão com 0,67% de PVDF foi depositada sobre a membrana Celgard 2400 por filtração à vácuo, sensibilizadas por luz UV por 1h (UVA, UVB/UVC) utilizando um sistema UV-Ozônio - Ozone Cleaner (PSD Series Digital UV-Ozone System, Novascan Technologies) ou plasma frio (com argônio, fluxo de 20 cm^3/min; a pressão foi mantida fixa de 0,5 mBar e o tempo de tratamento foi de 20 segundos e 12 mm de distância), Femto (Diener Femto PCCE Vacuum plasma system da Electronic Diener Plasma-Surface-Technology). As membranas Celgard 2400 com deposição de OG ficaram por uma noite em dessecador sob vácuo à 25 °C e no dia seguinte foram pesadas e as espessuras foram medidas. A determinação da quantidade de OG depositado foi calculada por pesagem das membranas antes e após a deposição. A Figura 1 apresenta a membrana obtida após a deposição por filtração à vácuo.

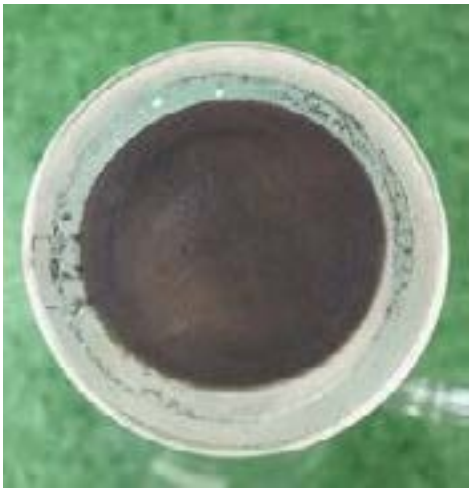


Figura 1: Óxido de grafeno depositado sob membrana Celgard 2400.

Para caracterização das membranas depositadas foram realizados os seguintes testes: MEV, espessura das membranas, ângulo de contato e medidas de impedância eletroquímica (EIS) para determinação da condutividade iônica.

3. RESULTADOS

3.1 Deposição de OG nas membranas

Em estudos anteriores, o ângulo de contato médio utilizando $LiPF_6$ nas membranas comerciais Celgard 2400 sem o carregamento de OG e com o carregamento de OG, foi de 40,2º e 18,0º respectivamente, uma redução de 55% aproximadamente. Quando medido nas membranas sensibilizadas por luz UV ou plasma depositadas com OG, reduz para cerca de 70% (12º). Observa-se que a membrana com OG apresenta melhor molhabilidade (menor ângulo de contato) do que a membrana Celgard 2400, que tem uma energia de superfície baixa e é naturalmente hidrofóbica. Uma taxa de absorção do eletrólito mais rápida pode encurtar o tempo de ativação durante o processo de montagem da bateria [3], além de facilitar o transporte dos íons lítio durante seu funcionamento. A melhora na absorção do eletrólito pode estar associada à prévia sensibilização das membranas, pois tanto a luz UV como o plasma frio induziram mudanças expressivas nos grupos funcionais do PP (bandas em 1700 - 1780 cm^{-1} e ~3500 cm^{-1}) melhorando a aderência do OG na membrana, como pode ser observado na Figura 2. O carregamento médio das membranas foi de 0,300 ± 0,03 mg cm^{-2} e a espessura média foi de 30 ± 5 µm.

A Figura 3 apresenta os resultados de MEV para as membranas Celgard 2400 sem recobrimento e em que foram depositadas a suspensão de OG com PVDF. Como pode ser observado, as amostras recobertas apresentam pequenas lâminas de OG, distribuídas uniformemente sobre a membrana.

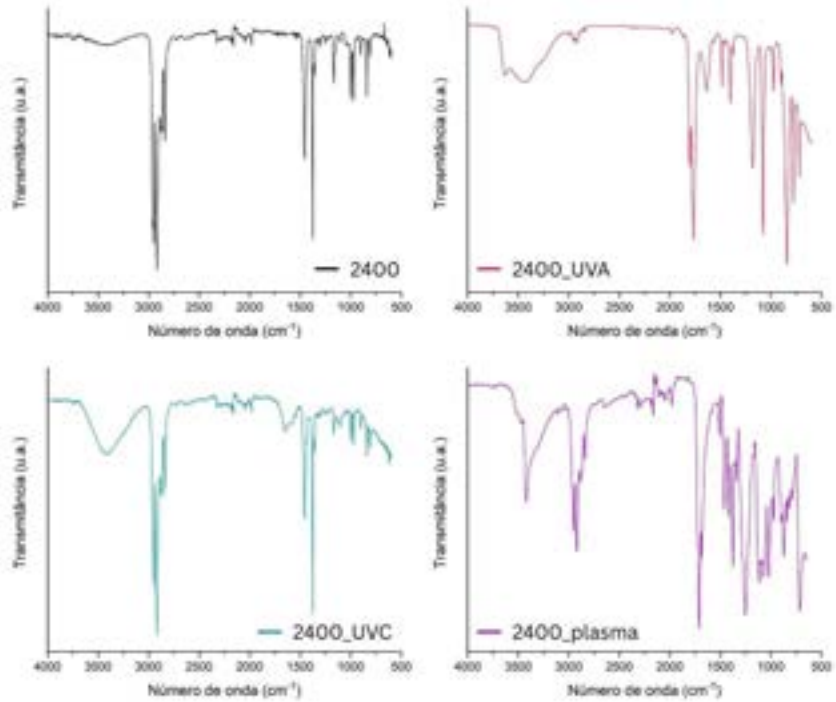
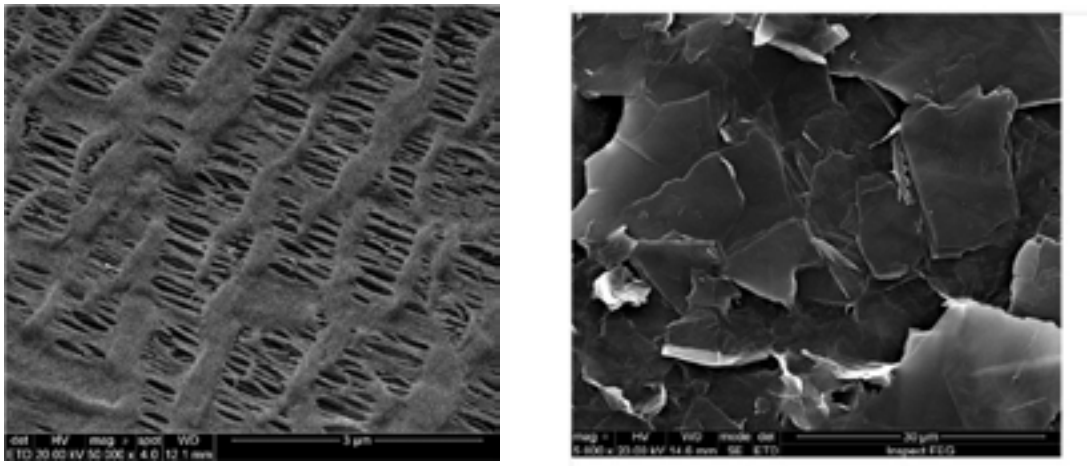


Figura 2: Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) da membrana comercial Celgard 2400, antes e depois da sensibilização.



(A) (B)

Figura 3: Imagens de MEV das membranas Celgard 2400 antes da deposição (A) e após a deposição com suspensão de OG (B).

A Tabela 1 apresenta os resultados da condutividade iônica obtidos pela medida de impedância (EIS) para a membrana Celgard 2400 sem recobrimento e recoberta por OG. As medidas foram realizadas a temperatura ambiente em potenciostato Autolab PSTAT302N (Metrohm, Suíça), os espectros foram obtidos nas frequências de 0,01 a 10^6 Hz e amplitude CA de 10 mV.

Tabela 1: Condutividade iônica das membranas Celgard 2400 obtidos por impedância eletroquímica (EIS).

Membrana	Condutividade iônica (mS. cm^{-1})
2400	0,66
2400 OG	0,84

Os resultados estão de acordo com a literatura [3] que especifica que a condutividade iônica das membranas deve estar entre 10^{-3} e 10^{-1} S. cm^{-1} e demonstram que as membranas recobertas com OG tem a condutividade iônica aumentada, indicando que a membrana recoberta tem maior retenção do eletrólito e uma porosidade mais elevada, proporcionando uma rápida mobilidade para os íons de lítio [6].

4. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos demonstraram que a deposição de OG com 10mL da suspensão e 0,67% de PVDF por filtração à vácuo foi eficiente. Após a deposição, a molhabilidade das membranas melhorou, podendo ser observada pela diminuição do ângulo de contato e, a espessura média se manteve constante resultando em uma camada de OG com aproximadamente 5µm. A condutividade iônica da membrana recoberta com OG foi maior que a membrana sem recobrimento, evidenciando uma melhor retenção do eletrólito, indicando que os separadores modificados com OG tem grande potencial para aplicações em baterias de lítio.

AGRADECIMENTOS

A FINEP, CNPq, PUCRS.

REFERÊNCIAS

[1] N. Sabetzadeh, C. Falamaki, R. Riahifar, M. S. Yaghmaee, and B. Raissi, “Plasma treatment of polypropylene membranes coated with zeolite/organic binder layers: Assessment of separator performance in lithium-ion batteries,” *Solid State Ion*, vol. 363, May 2021, doi: 10.1016/j.ssi.2021.115589.

[2] H. Lee, M. Yanilmaz, O. Toprakci, K. Fu, and X. Zhang, “A review of recent developments in membrane separators for rechargeable lithium-ion batteries,” Dec. 01, 2014, *Royal Society of Chemistry*. doi: 10.1039/c4ee01432d.
[3] D. M. D. Babiker, Z. R. Usha, C. Wan, M. M. El. Hassaan, X. Chen, and L. Li, “Recent progress of composite polyethylene separators for lithium/sodium batteries,” Apr. 30, 2023, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.jpowsour.2023.232853.
[4] T. G. Maraschin *et al.*, “Chitosan nanocomposites with graphene-based filler,” *Materials Research*, vol. 22, 2019, doi: 10.1590/1980-5373-mr-2018-0829.
[5] S. Wang, X. Liu, H. Duan, Y. Deng, and G. Chen, “Fe3C/Fe nanoparticles embedded in N-doped porous carbon nanosheets and graphene: A thin functional interlayer for PP separator to boost performance of Li-S batteries,” *Chemical Engineering Journal*, vol. 415, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.cej.2021.129001.
[6] XU, H. et al. “Sandwich-like polythioetherimide-decorated polypropylene (Celgard2400) composite separators with heat resistance and wettability for safety lithium-ion batteries”. International Journal of Electrochemical Science, vol. 15, n. 1, Jan. 2020, doi: 10.20964/2020.01.68.

44º SENAFOR

28th International Forging Conference
13th International Sheet Metal Forming Conference / 10th BrDDRG Congress
13th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies – Brazil/RS
2nd International Conference on Innovation in Materials and Manufacturing
Hotel Plaza São Rafael – P. Alegre RS, October 1-3, 2025

ESTUDO TEÓRICO-PRÁTICO DE BATERIA AUXILIAR $LiFePO_4$ DE VEÍCULO ELÉTRICO COMERCIAL SINISTRADO

Orides Jeremias Wachholz - Autor [1]
Jorge Pimentel de Morais - Autor [2]
Johnatan Pacini Bortoloto - Autor [3]
Lucas Melo Machado - Autor [4]
Marçal Rodrigues Pires - Orientador [5]
Vicente Mariano Canalli - Orientador [6]

RESUMO

Os veículos elétricos, além de sua bateria principal de alta tensão e capacidade de armazenamento, dispõem também de uma bateria auxiliar de baixa tensão (12V), que é utilizada para a alimentação de diversos circuitos e dispositivos, que não especificamente o de acionamento do veículo. Na verdade, a função desta bateria é a mesma da de um veículo convencional. Todavia com o avanço da tecnologia as tradicionais baterias auxiliares chumbo-ácidas tem sido substituídas por baterias Li-ion, ou de composição ainda mais modernizada. Estas baterias utilizam tecnologia avançada, e da mesma forma que as baterias tradicionais, são formadas por associações de células. Nesta tecnologia recente são utilizados circuitos como por exemplo o BMS – *Battery Management System*, que utiliza uma fonte de corrente e circuitos sensores que garantem a distribuição uniforma das tensões sobre as células. Além destes circuitos as baterias auxiliares contém outros dispositivos que serão abordados neste artigo.

Palavras Chave — Veículos Elétricos, Veículo sinistrado, Bateria Li Ion, Bateria auxiliar

[1] Electrical Engineering Student; CNPq Energy and Gas Application Group, Brazil
[2] Mechanical Engineer, CNPq Energy and Gas Application Group, Brazil
[2] Production Engineer Student, CNPq Energy and Gas Application Group, Brazil
[3] Materials Master's Student -, Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul, Brazil
[4 Professor Doctor Engineer - Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul, Brazil.
[5] Doctor Engineer - SSRC-VC – Space for Science Research and Culture V. Canali, Brazil.

O cunho teórico-prático deste trabalho foi impulsionado pela disponibilidade de um veículo elétrico sinistrado nas enchentes de 2024 no estado do Rio Grande do Sul. Desta forma se dispõe da bateria auxiliar para o estudo, permitindo inclusive documentar através de fotografias os efeitos da catástrofe sobre a mesma. Acredita-se que este estudo possa ser um ponto inicial importante para se conhecer mais sobre a manutenção destes veículos, que nos dias atuais consiste de um gargalo no cenário brasileiro.

THEORETICAL-PRACTICAL STUDY OF A LiFePO4 AUXILIARY BATTERY OF A DAMAGED COMMERCIAL ELECTRIC VEHICLE

Orides Jeremias Wachholz - Author (1)
Jorge Pimentel de Morais - Author (2)
Johnatan Pacini Bortoloto - Autor (3)
Lucas Melo Machado - Author (4)
Marçal Rodrigues Pires - Adviser (5)
Vicente Mariano Canalli - Adviser (6)

ABSTRACT

Electric vehicles, in addition to their main high-voltage battery with storage capacity, also have a low-voltage (12V) auxiliary battery, which is used to power various circuits and devices, not specifically for driving the vehicle. In fact, this battery's function is the same as that of a conventional vehicle. However, with technological advancements, traditional lead-acid auxiliary batteries have been replaced by Li-ion batteries, or batteries with even more modern composition. These batteries utilize advanced technology and, like traditional batteries, are composed of cell combinations. This recent technology utilizes circuits such as the BMS (Battery Management System), which utilizes a current source and sensor circuits that ensure uniform voltage distribution across the cells. In addition to these circuits, auxiliary batteries contain other devices that will be discussed in this article. The theoretical and practical aspects of this work were fueled by the availability of an electric vehicle damaged in the 2024 floods in the state of Rio Grande do Sul. This provided an auxiliary battery for the study, allowing for photographic documentation of the catastrophe's effects. We believe this study can be an important starting point for learning more about the maintenance of these vehicles, which currently constitutes a bottleneck in the Brazilian scenario.

1. INTRODUÇÃO

Segundo [1], no interior de um veículo elétrico, são encontrados dois sistemas elétricos muito diferentes. O principal sistema de propulsão é de alta tensão, comumente acima de 400V. Porém, alguns fabricantes de veiculos de alta performance, o sistema de tração se utiliza de packs de bateria principal acima de 800V. Esta bateria principal, alimenta os motores elétricos de alto torque nas rodas do veículo. O outro sistema é o auxiliar de 12V, semelhante aos sistemas elétricos já utilizados em veículos a combustão convencionais fabricados nas últimas sete décadas e/ou além. É útil pensar nas duas tensões em termos diferentes. Isso é importante porque a maioria dos dispositivos elétricos de um veículo elétrico – o sistema de

infoentretenimento, travas elétricas das portas, vidros elétricos, ventilador do sistema HVAC e sistemas de segurança, incluindo airbags e tecnologia de Sistemas Avançados de Assistência ao Condutor ADAS – *Advanced Driver-Assistance Systems,* todos operam com 12V. Inclui também a alimentação dos circuitos de iluminação, sinalização e de emergência. Se um veículo elétrico utilizasse o sistema de alta tensão para os acessórios e sistemas que não fossem os de propulsão, isso criaria um sério problema de segurança. Em caso de colisão, o perigo seria ainda maior se esta alta tensão entrasse em contato elétrico com o motorista. De acordo com [2], a bateria auxiliar de 12V utilizada, é geralmente de íons de lítio e pode ser de uma capacidade muito menor do que as baterias convencionais, devido a uma menor demanda de potência dos componentes eletrônicos, além de não precisar alimentar um motor de partida, ausente em veículos elétricos. Ao contrário dos veículos tradicionais com motor de combustão interna, os veículos elétricos dependem exclusivamente desta bateria auxiliar para executar funções importantes, como ativar o relé da bateria principal, que permite que a bateria de alta tensão acione e alimente os motores elétricos de propulsão. Assim sendo, a bateria auxiliar de baixa tensão, tem por função alimentar todos os sistemas eletrônicos do veículo, enquanto a bateria de alta tensão, além da tração, também é responsável pela alimentação do sistema de ar condicionado, que além de resfriar a cabine interna dos passageiros, também faz o resfriamento da própria bateria.

(a)superfície de apoio do banco traseiro

(b)bateria auxiliar

Figura 1: Condições da bateria auxiliar no veículo elétrico sinistrado

2. DISPONIBILIDADE E CUSTO DA BATERIA NOVA E DADOS NOMINAIS

A bateria auxiliar estudada com tecnologia Li-ion é vista na figura 2(a). Os dados nominais encontrados no adesivo são descritos na figura 2(b). Embora com uma capacidade bem menos que as baterias tradicionais chumbo ácidas, o custo desta bateria Li-ion é elevado, chegando a mais de 500 dólares, como mostra o anúncio da figura 2(c), fator que motivou este estudo.

(a)bateria auxiliar

FABRICANTE	BYD
MODELO	STEK-3703030A D1JBB0
kVAh	0,17
V	12,8V
V_{CGmax}	14V

(b) dados nominais

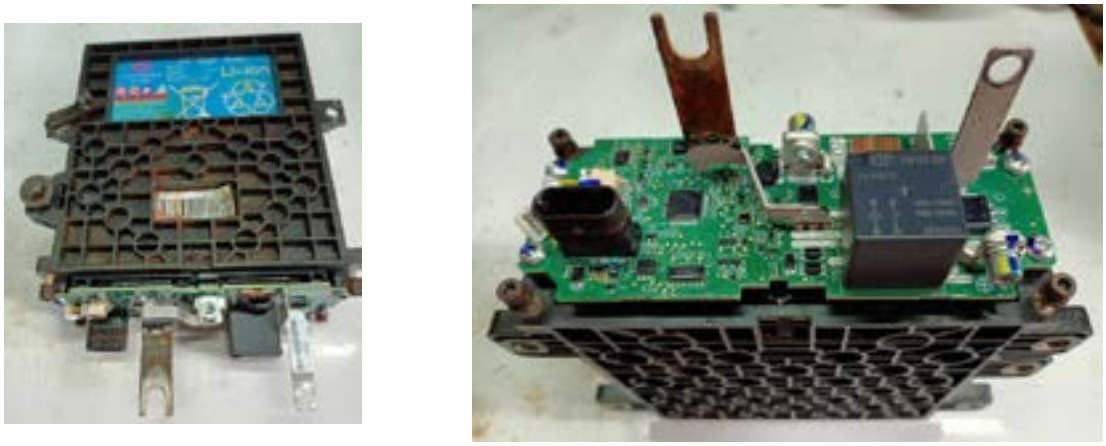
US$535,3

(c)custo [3]

Figura 2: Dados e anúncio no site Mercado Livre em 18/07/2025 – dólar R$ 5,58

3. PRINCIPAIS DIFICULDADES NA MANUTENÇÃO DA BATERIA AUXILIAR

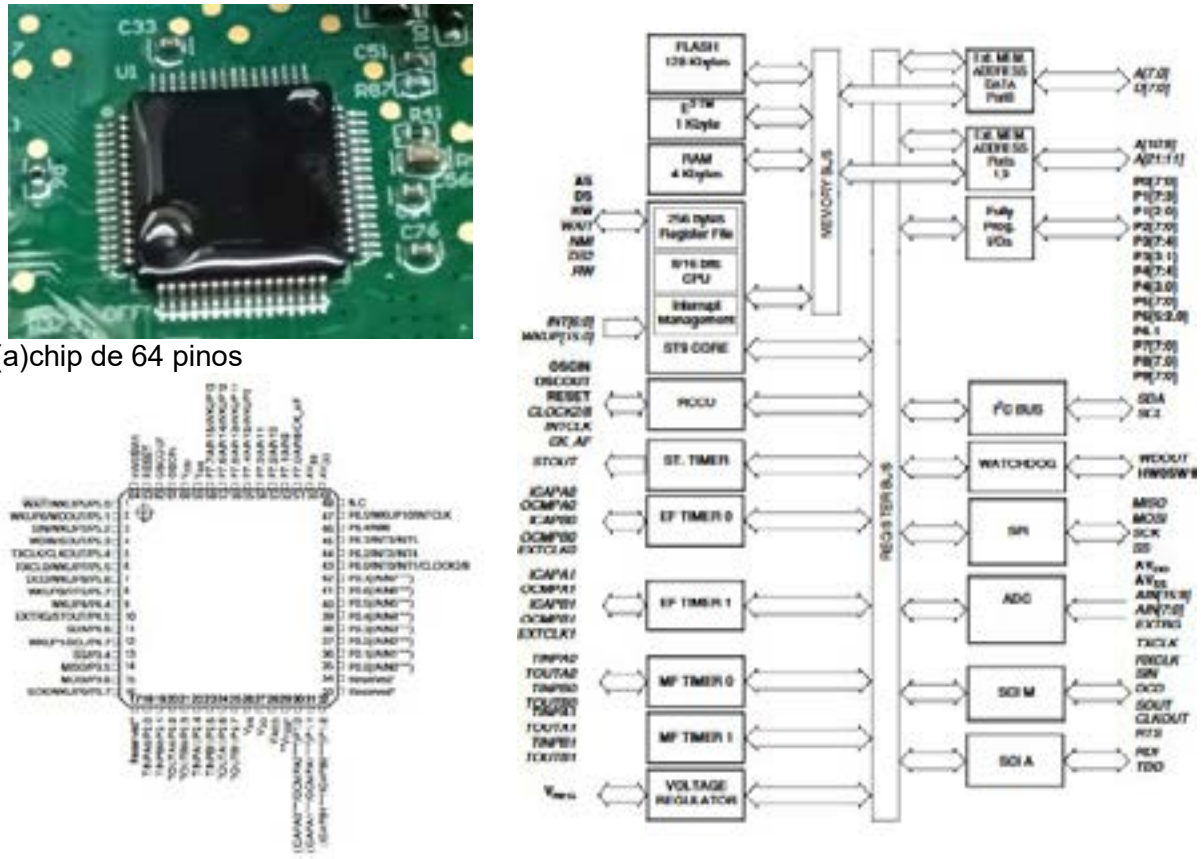
De maneira geral é possível afirmar que a manutenção de veículos elétricos é uma tarefa árdua e quiçá não recomendada. Todavia a disponibilidade de um veículo elétrico sinistrado, permitiu aguçar a curiosidade, auxiliando a elucidar tais dificuldades. A tarefa inicia analisando o interior da bateria, que contém uma placa eletrônica vista na figura 3.



(a)aberta (b)vista do circuito interno

Figura 3: Bateria auxiliar no veículo elétrico sinistrado

Analisando os chips verifica-se que a identificação dos mesmos não é visível. A presença de componentes eletrônicos de até 64 pinos ilustra complexidade dos circuitos. Esta quantidade de pinos é característica de processadores avançados [4], incluindo inúmeros blocos internos como exemplificado na figura 4



(a)chip de 64 pinos

(b)processador típico (c)diagrama em blocos do chip

Figura 4: Chip visualizado na placa de circuito impresso da bateria auxiliar [4]

4. DIAGRAMA EM BLOCOS DE UMA BATERIA AUXILIAR LI-ION

De acordo com [5] , além das células e módulos, o sistema da bateria também possui um controlador de dispositivos com detecção de sinal e componentes eletrônicos de potência. Esses

componentes são integrados e operam em sincronia com o sistema de operação do veículo elétrico. No diagrama em blocos da Figura 5, o módulo de bateria é um componente de armazenamento de energia, composto por múltiplas células de bateria, que podem ser conectadas em série ou em paralelo.

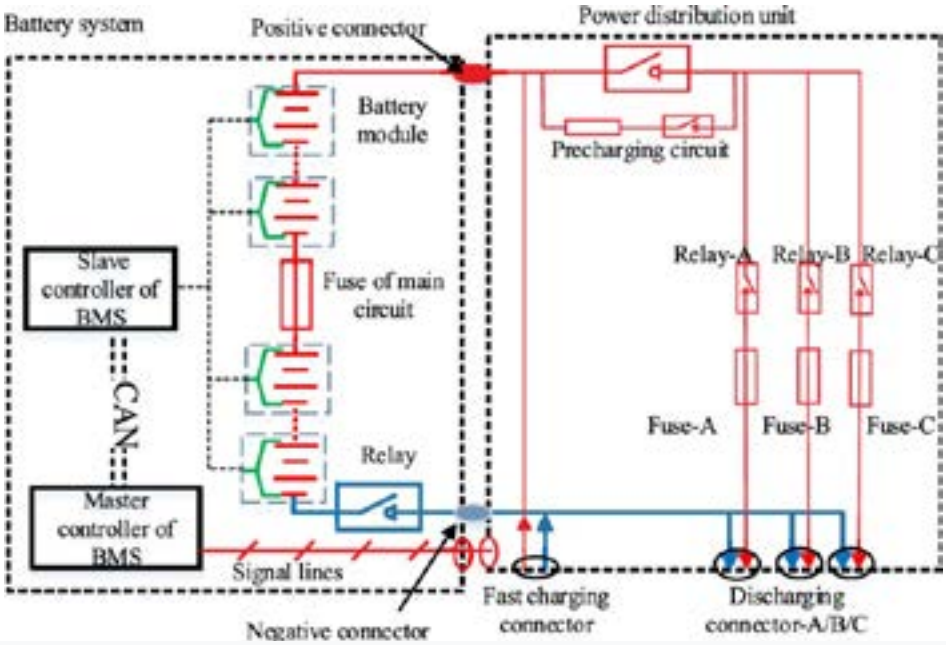


Figura 5: Diagrama genérico do circuito envolvendo a bateria auxiliar [5].

Quando qualquer uma dessas células falha ou envelhece, outras células precisam compartilhar mais carga para fornecer a energia necessária. Isso é prejudicial às células da bateria, pois pode acelerar o seu envelhecimento. É importante destacar que a qualidade das células da bateria em módulos de bateria tem um impacto profundo na confiabilidade de todo o sistema de bateria. O controlador BMS é responsável por monitorar e gerenciar o sistema de baterias. Este controlador mede a tensão, a corrente e a temperatura de células individuais da bateria e analisa os dados medidos. Uma estratégia de controle apropriada previne a presença de incidentes anormais, como descarga excessiva, sobrecarga e temperatura excessiva do sistema de baterias. Conforme mostrado na Figura 1, o controlador BMS é geralmente composto por duas partes, ou seja, um controlador mestre e um controlador escravo. O primeiro é responsável por comunicar-se com a unidade de controle do veículo (VCU) e desenvolver estratégias de controle; o último é responsável para coletar os resultados das medições de corrente, tensão e temperatura de células individuais da bateria e implementar o gerenciamento do balanceamento de energia das células. Os componentes eletrônicos de potência incluem fusível e relé. A função do fusível é proteger as células da bateria de danos causados pelo excesso de corrente na presença de uma falha de curto-circuito; a função de um relé é controlar a operação de ligar e desligar a bateria ao sistema elétrico. Em caso de emergência, o relé pode ser usado para cortar o fornecimento de energia ao sistema elétrico e garantir a segurança do sistema de bateria. Os componentes de detecção de sinais do sistema de baterias incluem sensores de corrente, sensores de tensão e sensores de temperatura. Com base nos sinais medidos por esses sensores, o controlador BMS pode avaliar o status operacional de todas as células da bateria e enviar comandos ao sistema em tempo real. A partir da descrição acima, conclui-se que a falha de qualquer um desses componentes pode resultar na falha de todo o sistema de baterias.

5. ASPECTOS DE CONFIABILIDADE E SEGURANÇA

Segundo [5], até o momento, é impossível quantificar o quão significativamente os componentes da bateria podem afetar a confiabilidade de todo o sistema de alimentação e como a confiabilidade do sistema de baterias evoluirá ao longo do tempo. Devido ao envelhecimento, a

confiabilidade do sistema de bateria do VE diminuirá gradualmente com o aumento do seu tempo de serviço. Além disso, é interessante constatar que na eventualidade de sinistros a degradação é dominada principalmente pelo controlador BMS, e não pelas células e módulos de bateria. Apesar do tempo de serviço, no nível dos subsistemas, o controlador BMS é menos confiável do que outros subsistemas no sistema de baterias, sua taxa de falhas é maior do que a soma das taxas de falhas dos outros subsistemas. Nestes subsistemas se inclui, conectores do sistema de baterias e módulo de baterias, todos os componentes eletrônicos de potência e todos os componentes de detecção de sinais. A nível de peças ou componentes, o módulo de célula de bateria, os SMCs - *Safety Management & Control Systems* para o controlador mestre e os SMCs para o controlador escravo são os três componentes mais vulneráveis no sistema de baterias. Os indicadores do BMS devem mostrar o estado de segurança, uso, desempenho e longevidade da bateria. Devido à volatilidade, inflamabilidade e mudanças de entropia, uma bateria de íons de lítio pode inflamar se sobrecarregada. Este é um problema sério, especialmente em aplicações de VEs e HEVs, porque uma explosão pode causar um acidente fatal. Além disso, a descarga excessiva causa redução da capacidade da célula devido a reações químicas irreversíveis. Portanto, um BMS precisa monitorar e controlar a bateria com base no circuito de segurança incorporado aos conjuntos de baterias. Sempre que quaisquer condições anormais, como sobretensão ou superaquecimento, forem detectadas, o BMS deve notificar o usuário e executar o procedimento de correção predefinido. Além dessas funções, o BMS também monitora a temperatura do sistema para fornecer uma melhor eficiência energética e se comunica com componentes e operadores individuais.

6. ANÁLISE E DOCUMENTAÇÃO DE COMPONENTES DA BATERIA AUXILIAR

Na prática uma recarga desta bateria de forma similar a uma bateria convencional se torna impossível. Como visto, a placa interna da bateria auxiliar vista na figura 6 contém um relé é controlar a operação de ligar e desligar a bateria ao sistema elétrico. Uma vez retirada a bateria do veículo constata-se que as células interna não são acessíveis ao carregador tendo em vista que o relé citado se encontra desativado.
Uma análise da placa permitiu verificar que o relé é aplicado ao polo positivo da bateria, de maneira distinta do diagrama da figura 5. Por meio de testes de continuidade foi possível identificar na placa, mediante a numeração os terminais de contato e bobina do relé.

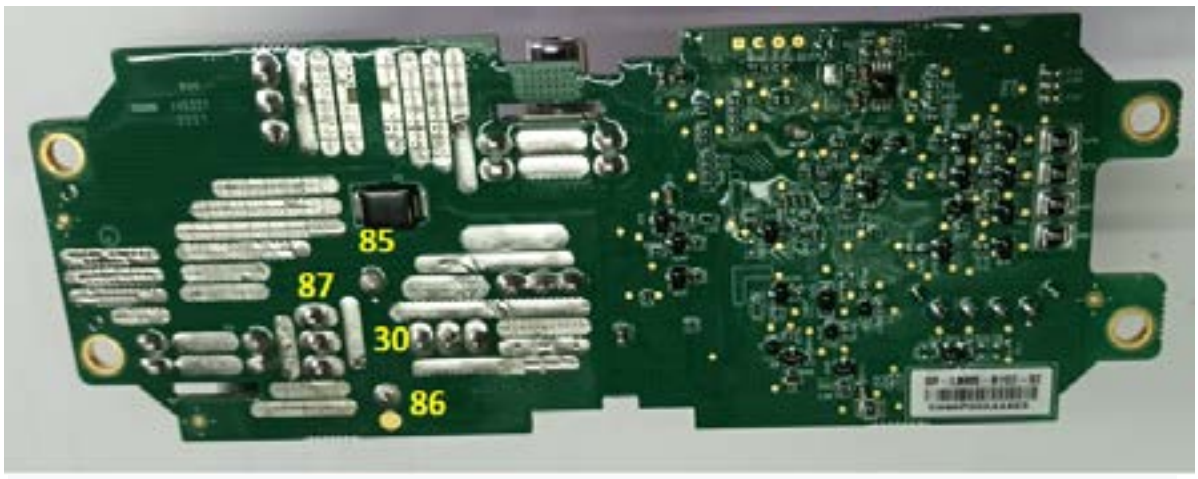
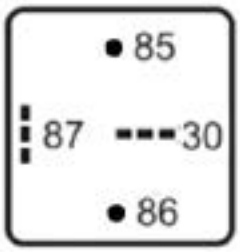
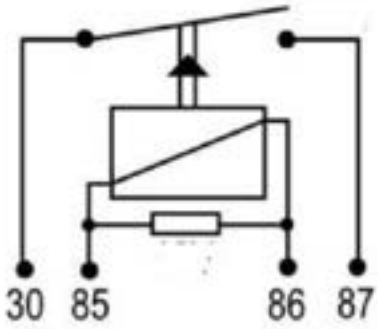


Figura 6: Terminais de acionamento e contatos relé que impede o contato com as células

Em relés da norma alemã DIN 72552 [6], os contatos normalmente são identificados por números, seguindo um padrão da norma DIN. Os contatos normalmente abertos (NA) são identificados pelo número 87, enquanto os terminais da bobina são 85 (negativo) e 86 (positivo), e o contato comum do contato é o 30. A figura 7 apresenta o relé que impede o contato com as células internas da bateria, a identificação de seus pinos e diagrama.

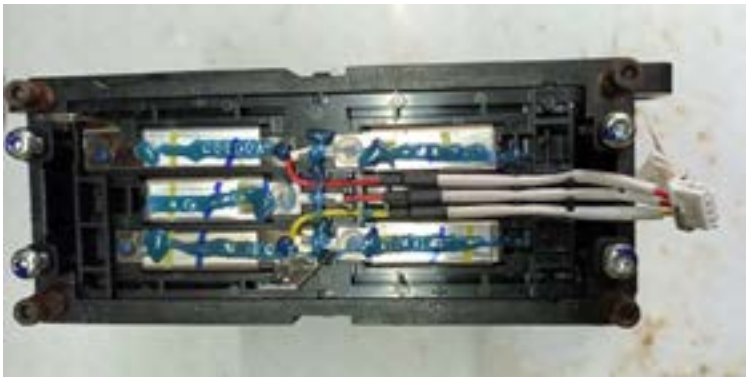


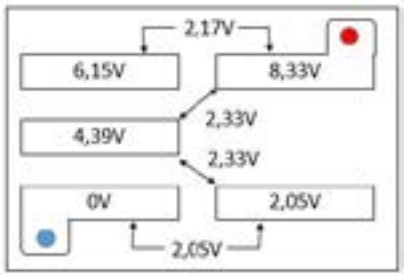


(a)vista com dados (b) pinos do relé (c)diagrama

Figura 7: Relé que impede o contato com as células internas

Na figura 8(a) é apresentado o módulo interno que contém a associação de células Li-ion, e na figura 8(b) os terminais e tensões intermediárias da associação, registradas na primeira medição após o sinistro.

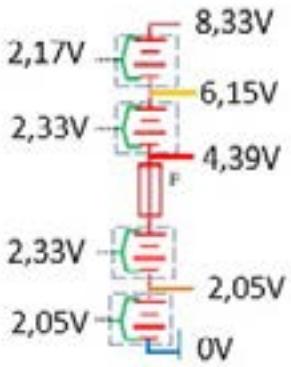




(a)associação de células e conector do BMS (b)tensões pós sinistro

Figura 8: Células Li-ion associadas no interior da bateria

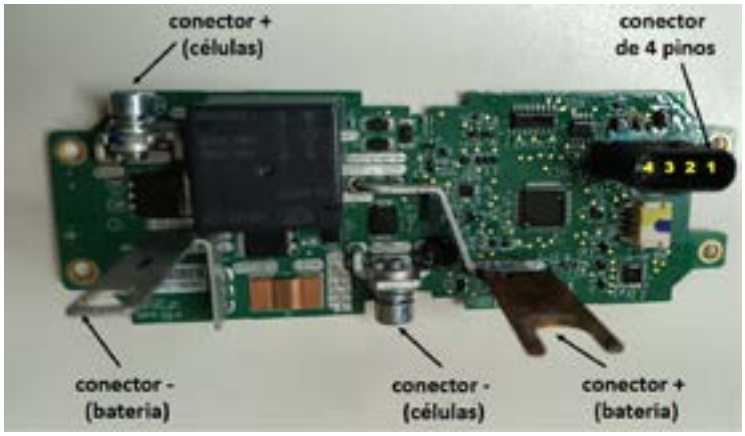
Um diagrama da associação das células é vista na figura 9(a) e o conector do BMS na figura 9(b)

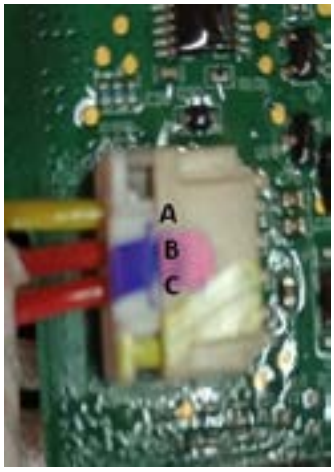


(a)diagrama da associação (b)conector do BMS

Figura 9: Células Li-ion e BMS

Na figura 10 tem-se uma vista do relé que desliga o terminal positivo e dos componentes e conectores da placa interna de circuito impresso da bateria auxiliar. Na figura 10(a) são identificados os principais terminais e na figura 10(b) a entrada do conector BMS que vem da associação de células





(a)identificação dos terminais (b)entrada BMS

Figura 10: Identificação de terminais na placa interna da bateria auxiliar

7. TESTE E IDENTIFICAÇÃO DE TENSÕES DO CONECTOR DE 4 PINOS

N figura 11(a) é ilustrado o conector de 4 pinos, o que resulta distinto das baterias tradicionais que contém apenas o borne negativo e positivo.

PINOS	ESPERADO	MEDIDO	PINOS
Pino 1 B+	12V	12,8V	**B+**
Pino 2 B-	0V	6,42V	**BMS_EN**
Pino 3 IGN	0V	0V	IGN
Pino 4 - BMS_EN	0-5V	0V	

(a)vista do conector (b)pinos e tensões (c) teste de bancada

Figura 11: Análise do conector de 4 pinos

De acordo com fóruns de discussão não referenciáveis segundo a I.A. – Inteligência Artificial do Google, o conector de 4 pinos para bateria auxiliar possui pinos para alimentação positiva e negativa, sinal de ignição (IGN) e sinal de controle (BMS_EN). As tensões variam conforme o estado do veículo: alimentação e IGN normalmente com 12V, e BMS_EN com 0-5V, de acordo com o sistema da bateria.

Análise detalhada:

a)Pino 1 - Alimentação Positiva B+:

Fornece a tensão de 12V para alimentar os sistemas básicos do veículo, como reconhecimento da chave, fechamento e abertura de portas, iluminação interna, entre outros.

b) Pino 2 - Alimentação Negativa B-:

É o terra, conectado ao terminal negativo da bateria.

c) Pino 3 - Sinal de Ignição (IGN):

Este sinal indica o estado da ignição do veículo. Quando o veículo é ligado, a tensão aplicada neste pino é de 12V, fazendo com que a bateria auxiliar seja ativada para carregar e fornecer energia, permitindo a ativação de diversos sistemas.

d) Pino 4 - Sinal de Controle (BMS_EN):

Este pino controla o gerenciamento da bateria auxiliar pelo Sistema de Gerenciamento de Bateria (BMS). A tensão neste pino varia tipicamente entre 0-5V, indicando o estado da bateria e a necessidade de ativação ou desativação do carregamento ou outras funções.A correta

identificação e conexão dos chicotes é crucial para evitar danos ao sistema elétrico do veículo e na bateria auxiliar. O uso de ferramentas adequadas e a observância das precauções de segurança são essenciais ao trabalhar com sistemas elétricos de veículos.
Segundo estes fóruns, é fundamental consultar o manual do veículo e da bateria para confirmar as especificações exatas de tensão dos pinos, pois podem variar entre diferentes modelos.
Visando verificar sinais na bateria disponibilizada e mesmo sem realizar a recarga das células, foi possível analisar as tensões substituindo o módulo de células por uma fonte de tensão continua ajustável como visto na figura 12, sendo constatadas tensões similares nos pinos 1 e 2.

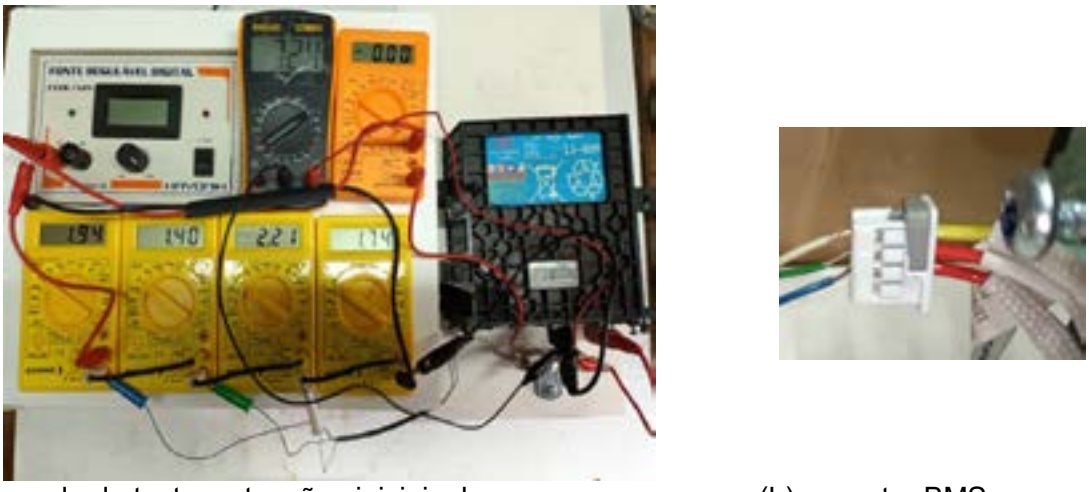
(a)tensão no pino1 (b)tensão no pino 2

Figura 12: Medição de tensões com fonte regulável simulando associação de células

A partir do resultado do ensaio foram inferidas as tensões analisadas experimentalmente e apresentadas na figura 11(c).

8. BANCADA PARA RECARGA ANÁLISE DA TENSÃO EM CADA CÉLULA

A capacidade C de uma bateria, medida em Ampere-hora (Ah), indica a quantidade de carga elétrica que a bateria pode armazenar e fornecer durante um determinado período de tempo. A bancada desenvolvida proporcionou uma carga direta lenta nas células da bateria com uma corrente menor do que C/25 e monitoramento da tensão em cada célula através de voltímetros, como ilustrado na figura 13(a) com os valores de tensões de carga iniciais. O conector do BMS visto na figura 13(b) permitiu coletar as tensões das células intermediárias que vão aumentando do pino inferior até o superior da mesma figura. Na adaptação foram utilizados fios com a mesma bitola dos pinos do conector e pinos banana nas extremidades que foram conectadas aos voltímetros.



(a) bancada de testes e tensões iniciais de carga (b) conector BMS

Figura 13: Leitura inicial na bancada para recarga com medição da tensão em cada célula

A figura 14(a) ilustra a tensão atingida pelas células após a recarga. A bateria foi testado utilizando uma lâmpada LED de 12V e 9W. No teste inicial após 6 horas de descarga a bateria apresentou uma tensão de 13,22V. Prevê-se testes mais rigorosos na medida em que for recuperada a bateria principal, tendo em vista a interação que ocorre entre as mesmas.

(a) tensão em cada célula

(b) descarga após 6 horas

Figura 14: Leitura final de recarga com medição

CONCLUSÃO

As tradicionais baterias chumbo-ácidas utilizadas nos veículos convencionais são compostas em sua maioria unicamente por células galvânicas associadas em série, sendo a sua tensão nominal de 12V. A principal função desta bateria é de alimentar os circuitos de partida, sinalização e iluminação dos veículos. Em veículos elétricos comerciais tem-se uma bateria similar, denominada de auxiliar, uma vez que existe outra bateria principal de tensão elevada e de capacidade muito maior, destinada exclusivamente para seu tracionamento. Segundo as montadoras, se um veículo elétrico utilizasse o sistema de alta tensão para os acessórios e sistemas que não sejam de propulsão, isso criaria um sério problema de segurança. Segundo os fabricantes em qualquer circuito interno do carro exigiria equipamento especializado. Considerando o aporte cada vez maior de tecnologia avançada nestes veículos, como exemplo a conexão inteligente entre a bateria principal e a auxiliar com vistas a seu carregamento emergencial, os circuitos elétricos passam a ser interdependentes. Somados a esta interdependência se adiciona a falta de informações dos fabricantes que se restringem às concessionárias e os chips raspados, que inviabilizam a manutenção por pessoal técnico especializado como uma ferramenta de sustentabilidade. Neste estudo foi abordada uma bateria auxiliar comercial, utilizada em um veículo elétrico comercial sinistrado. Embora a primeira impressão seja pelo descarte da mesma, um estudo foi realizado com documentação fotográfica de aspectos importantes nesta discussão relacionada a veículos ecológicos. Inicialmente submeteu-se a bateria a medidas externas e a uma tentativa de recarga, que não surtiram efeito. Uma vez desmontada e examinada a bateria, verificou-se a presença de uma placa de circuito impresso interna responsável por gerenciar primariamente o equilíbrio das células no processo de recarga. A presença de um relé eletromecânico no terminal positivo da bateria Li-Ion, demonstrou ser responsável por impedir a interação elétrica externa. Além do conector interno destinado ao BMS, um segundo conector externo de quatro pinos teve sua tensão examinada mediante a utilização de uma fonte ajustável. Mediante o acesso interno as células Li-ion, que por ocasião do sinistro verificou-se que as células apresentaram uma tensão reduzida e relativamente uniforme. Uma bancada foi desenvolvida de forma a permitir a documentação e recarga da bateria auxiliar com o exame da evolução das tensões em casa célula da associação. A automação avançada com interdependência de circuitos pode dificultar a manutenção destes veículos elétricos pelo pessoal técnico, o que torna os mesmos descartáveis ou pouco sustentáveis, também estando fortemente suscetíveis as informações e regras impostas pelo fabricante. Um fato conseguir lograr que a bateria carregue, outro é poder reutiliza-la e dar-se conta de que a mesma será submetida a fugas o que pode fazer com que a mesma descarregue

sobre os circuitos que estão associados a seu controle. Uma manutenção neste nível seria fortemente recomendada infringindo-se desta forma conceito de sustentabilidade e economia uma vez que estas baterias não são compatíveis a manutenção em uma simples auto elétrica.

AGRADECIMENTO

O grupo agradece o apoio dos organizadores do RENOMAT e em especial ao Prof. Lírio Schaeffer, e também ao proprietário do veículo Johnatan Bortolotto e seu pai Valderino, pelo incentivo às iniciativas.

Referências

[1] (2025) SITE: MIDTRONICS - https://www.midtronics.com/blog/why-do-fully-electric-vehicles-still-have-a-12v-battery-in-them/

[2] (2025) SITE: NAPANEXDRIVE - https://napanexdrive.ca/en/maintenance-and-repair/12v-auxiliary-battery

[3] (2025) SITE: MERCADO LIVRE - https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-5242031368-bateria-auxiliar-partida-byd-dolphin-gs-180-ev-2024-2025

[4] SHU X., YANG W, A reliability study of electric vehicle battery from the perspective of power supply system, Journal of Power Sources · March 2020

[5] (2025) SITE ST MICROELECTRONICS https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/181850/ST MICROELECTRONICS/LQFP64.html

[6] DIN 72552: Designação de terminais elétricos. Berlim: DIN, 1978.

44º SENAFOR

28ª Conferência Internacional de Forjamento - Brasil
14ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas / 11º Congresso do BrDDRG
14ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis
3ª Conferência Internacional de Inovação em Materiais e Manufatura
Porto Alegre, RS, dias 1, 2 e 3 de outubro de 2025
www.senafor.com

ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA E VALIDAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE COLETORES SOLARES COM PLACAS ABSORVEDORAS DE CALOR FABRICADAS POR ESTAMPAGEM INCREMENTAL

Gilson de March [1]
Marcos Antônio Jeremias Coelho [2]
Lirio Schaeffer [3]
Anderson Daleffe [4]
Daniel Fritzen [5]
Fábio André Lora [6]
Max Gabriel Steiner [7]
Ricardo José Alves de Sousa [8]
Guilherme José de Antunes e Sousa [9]

RESUMO

Este trabalho apresenta uma investigação experimental e técnica sobre a aplicação da estampagem incremental (*Incremental Sheet Forming* – ISF) na fabricação de placas absorvedoras para coletores solares, utilizando chapas de alumínio 1200 H14 com espessura de 1,5 mm. O objetivo principal é analisar a viabilidade da conformação direta de canais na superfície da chapa metálica, como alternativa à utilização de tubulações de cobre, visando a redução de custos e simplificação do processo produtivo, sem comprometer o desempenho térmico do sistema. Após a conformação, as placas absorvedoras foram integradas a sistemas de circulação forçada de água. A metodologia incluiu a realização de simulações térmicas por meio de software específico, seguidas de testes práticos de exposição solar em bancada experimental. A comparação entre os dados simulados e os obtidos experimentalmente permitem avaliar o comportamento térmico dos coletores em condições reais de operação. Os resultados demonstraram uma boa correlação entre os modelos teóricos e os dados experimentais, validando a aplicação da estampagem incremental na fabricação desses componentes funcionais. O estudo confirma o potencial da estampagem incremental como uma tecnologia viável e adaptável para a produção de soluções de energia renovável.

[1] Doutorando, UFRGS, E-mail: gilson.march@satc.edu.br
[2] Prof. ME., UNISATC, E-mail: marcos.coelho@satc.edu.br
[3] Prof. Dr., UFRGS, E-mail: schaefer@ufrgs.br
[4] Prof. Dr., UNISATC, E-mail: anderson.daleffe@satc.edu.br
[5] Prof. Dr., UNISATC, E-mail: daniel.fritzen@satc.edu.br
[6] Prof. Dr., UFRB, E-mail: fabio.lora@ufrb.edu.br
[7] Mestre, UNISATC, E-mail: max.steiner@satc.edu.br
[8] Professor Catedrático, Universidade de Aveiro, E-mail: rsousa@ua.pt
[9] Doutorando, Universidade de Aveiro. E-mail: gui.sousa@ua.pt

Palavras-chave: Coletor solar; Simulação térmica; Radiação solar.

1. INTRODUÇÃO

No contexto energético brasileiro, este se sobressai por apresentar um dos maiores potenciais para a geração de energia solar, em função da elevada incidência de radiação global média ao longo de seu território [1]; [2]. Aproximadamente um quarto da eletricidade consumida em residências do país é destinada ao aquecimento de água, o que evidencia a relevância de soluções térmicas mais sustentáveis e economicamente viáveis, como a utilização de coletores solares planos [3]; [4]; [5].

A energia solar térmica desempenha um papel importante; os coletores solares são dispositivos que capturam a radiação solar e a convertem em calor. Segundo o Atlas da Eficiência Energética Brasil em 2021 [6], em 2020 a área acumulada de coletores instalados para aquecimento solar no país alcançou aproximadamente 19,2 milhões de m², com quase 70% desse total pertencente ao setor residencial. O relatório também destaca que a adoção desses sistemas contribui para diminuir o consumo de eletricidade, reduzir a demanda de pico e mitigar perdas técnicas no sistema elétrico [6]; [7].

A crescente demanda por fontes sustentáveis de energia tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes no aproveitamento da energia solar. Os coletores solares planos são amplamente utilizados para o aquecimento de água, sendo a eficiência térmica um dos principais parâmetros para mensurar seu desempenho. A técnica de estampagem incremental tem sido aplicada na fabricação das placas absorvedoras desses coletores, permitindo a conformação de formas complexas que aumentam a área de contato com o fluido térmico e potencialmente melhoram a transferência de calor [8]; [9].

O coletor solar é composto não apenas pela placa absorvedora, conhecida como corpo negro, mas também por outros elementos que garantem proteção térmica e mecânica ao sistema. Essa placa é instalada dentro de uma estrutura que oferece resistência mecânica e isolamento térmico, com o objetivo de maximizar o calor transmitido à água que circula pela serpentina. O sistema completo é constituído pelo coletor solar e pelo mecanismo de circulação da água, no qual um reservatório é posicionado próximo ao coletor, com conexões por mangueiras para permitir a circulação do fluido térmico [10]; [11]; [12]; [13]. Conforme apontam diversos autores [14]; [15], os coletores solares planos constituem a tecnologia mais utilizada para o aquecimento de água.

A eficiência térmica dos coletores solares é um parâmetro fundamental para avaliar seu desempenho na conversão da radiação solar em energia térmica utilizável. Coletores solares com placas absorvedoras otimizadas permitem uma maior captação e retenção de calor, o que aumenta significativamente a eficiência do sistema. A fabricação dessas placas por técnicas avançadas, como a estampagem incremental, tem ganhado destaque por proporcionar flexibilidade no design e melhorias na eficiência térmica dos coletores solares planos [16]; [17].

Além dos métodos experimentais tradicionais, a simulação da eficiência térmica dos coletores solares tornou-se uma ferramenta essencial na validação e otimização dos designs dos sistemas. Por meio de modelos computacionais, é possível analisar detalhadamente a transferência de calor e o comportamento térmico das placas absorvedoras sob diferentes condições de operação, o que contribui para a melhoria do desempenho dos coletores e para a previsão precisa de sua eficiência. Em particular, simulações permitem avaliar efeitos de variáveis como fluxo de fluido, irradiância e

propriedades materiais, proporcionando uma compreensão abrangente do fenômeno térmico e auxiliando no desenvolvimento de coletores mais eficientes e econômicos [18]; [19]; [20].

Deste modo, este trabalho visa avaliar a viabilidade técnica, térmica e produtiva da aplicação do processo de estampagem incremental (ISF) na fabricação de placas absorvedoras para coletores solares, integrando análises experimentais e simulações computacionais térmicas, com o intuito de verificar o desempenho dos coletores em condições reais de operação.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os detalhes do trabalho realizado estão descritos senta seção.

2.1 PLACA COLETOR SOLAR PLANO

O coletor solar foi projetado a partir da combinação de duas chapas com área de 0,0784m² cada, sendo uma plana e outra conformada por meio da estampagem incremental. Os canais de circulação da água foram elaborados com geometrias em formato de meia-lua, possibilitando a investigação da influência da seção transversal sobre o desempenho térmico. Na Figura 1 apresentada a chapa conformada, da estampagem incremental.

Figura 1: Estratégias de fabricação do coletor solar.

O coletor solar foi projetado a partir da combinação de duas chapas com área de 0,0784m² cada, sendo uma plana e outra conformada por meio da estampagem incremental. Os canais de circulação da água foram elaborados com diferentes geometrias em formato de meia-lua, possibilitando a investigação da influência da seção transversal sobre o desempenho térmico. Na Figura 2 estão apresentadas as chapas conformadas, evidenciando diferentes configurações de estampagem incremental, com três e cinco canais retos, com diferentes estratégias do tipo de contorno e central do canal, com alturas de 8 mm e 10 mm, respectivamente.

Os parâmetros empregados na máquina para a estampagem incremental, incluindo os incrementos e o uso de ferramenta semiesférica, com profundidade total de 10 mm, estão apresentados na Tabela 1.

Descrição	Valor
Incremento Vertical (Δ_z)	0,5 mm
Velocidade de Avanço *(f)*	1.000 mm/min
Rotação da ferramenta *(S)*	Livre

Tabela 1: Parâmetro estampagem incremental.

A placa absorvedora tem a função de captar a radiação solar e transferi-la ao fluido

térmico na forma de calor. Trata-se de uma chapa plana revestida com tinta preta, o que potencializa a absorção da radiação solar. Para sua fabricação, foi empregado alumínio da liga 1200 H14, em consonância com estudos anteriores. [21].

A Figura 2 exemplifica o formato da placa para absorção da radiação solar.

Figura 2: Modelo de Coletor Solar fabricado

2.2 MONTAGEM COLETOR SOLAR

O coletor solar foi montado em uma caixa de madeira isolada termicamente, dimensionada para acomodar duas placas absorvedoras, integradas a uma tubulação de 10 mm e com sensores posicionados entre as placas, conforme figura 3. Na parte superior da estrutura, instalou-se um vidro temperado de baixo teor de ferro, com 4 mm de espessura, visando aumentar a transmissão da radiação solar e proporcionar proteção mecânica ao sistema. [22]; [23]; [24].

Figura 3: montagem externa do coletor solar

2.3 SIMULAÇÃO

Para a etapa de simulação numérica, utilizou-se o software *SolidWorks Flow Simulation* 2025, baseado no método dos volumes finitos e totalmente integrado ao ambiente CAD. O modelo numérico replicou o protótipo experimental do coletor solar plano em alumínio, com canais integrados para circulação de água. Foi considerado o regime de transferência de calor conjugada (CHT), englobando condução no domínio sólido e convecção no domínio fluido.

As equações de governo resolvidas foram as de Navier-Stokes médias de Reynolds (RANS) em regime permanente, associadas à equação da energia. A turbulência foi modelada pelo esquema k–ε com funções de parede generalizadas. As

propriedades ópticas da superfície exposta foram definidas com absorvidade solar de 0,95 e emissividade térmica de 0,90. Para o tratamento da radiação, aplicou-se o modelo *Discrete Transfer Radiation Model* (DTRM), considerando condições ambientais de 54 °C, 65% de umidade relativa e convecção equivalente a 7,14 m/s.

O fluido de trabalho foi água líquida, com vazão de entrada de 0,85 L/min ($1{,}416\times10^{-5}$ m³/s) a uma temperatura de 24,4 °C, enquanto a saída foi fixada em pressão manométrica de 0 Pa. A malha computacional foi estruturada em grade cartesiana com refinamento global nível 4 e controle local nas paredes da placa absorvedora e nos canais. Foram utilizadas cinco camadas prismáticas para melhor resolução da região de contorno. O modelo computacional, com 259.113 células no total (127.564 no domínio do fluido e 131.549 no sólido), permitiu prever o campo térmico na placa absorvedora e a evolução da temperatura da água.

Para reduzir a complexidade computacional, algumas simplificações foram adotadas: as conexões hidráulicas (joelhos, curvas e tubos de ligação entre passes) não foram modeladas individualmente, assumindo-se que não haveria perdas adicionais ou trocas de calor significativas nesses trechos. Esse tratamento foi considerado adequado, visto que o foco principal da análise foi o desempenho térmico global do coletor.

O critério de convergência adotado foi uma variação absoluta máxima de 0,01 K na temperatura média de saída, atingido após cerca de 63 iterações. Assim, o modelo CFD permitiu prever o campo térmico na placa absorvedora e a evolução da temperatura da água, servindo de base para comparação com os resultados experimentais.

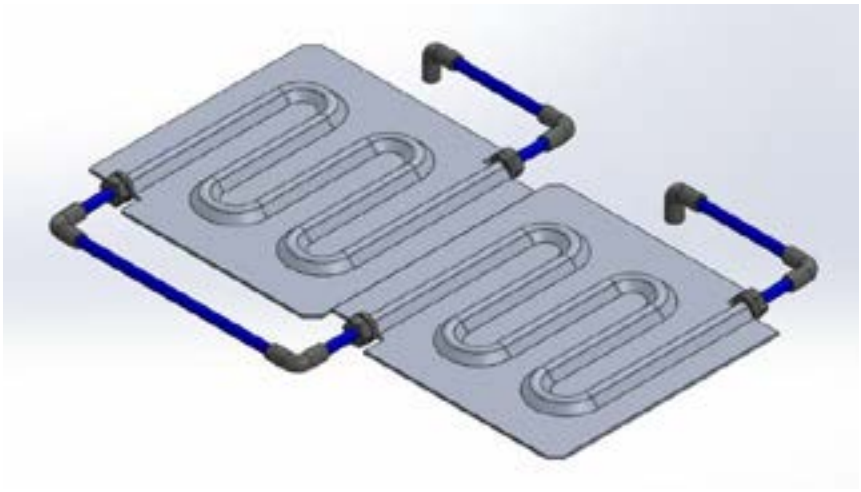


Figura 4: Montagem na simulação das placas do coletor solar.

2.4 SISTEMA DE MEDIÇÃO E CONTROLE

O sistema experimental contou com um arranjo de monitoramento e controle projetado para avaliar o desempenho térmico do conjunto de aquecimento, o diagrama de bloco das conexões é apresentado na Figura 4. A circulação do fluido térmico foi realizada por meio de uma bomba centrífuga de corrente contínua de 24 Vcc, com vazão máxima de 2 L/min, alimentada por uma fonte de 220 Vca/24 Vcc, garantindo estabilidade operacional durante os ensaios.

A medição da vazão foi obtida com um sensor do tipo YF-S201, que opera pelo efeito Hall e fornece pulsos proporcionais ao fluxo de água. O dispositivo foi conectado a uma placa de prototipagem Arduino Nano, responsável pelo processamento dos pulsos e pela conversão em valores de vazão instantânea, possibilitando o

monitoramento da taxa de recirculação do fluido no sistema.

As variáveis térmicas foram registradas por meio de quatro sensores de resistência de platina do tipo PT100, devidamente calibrados para assegurar rastreabilidade metrológica. Os pontos de aquisição foram definidos de forma a caracterizar o comportamento térmico em diferentes regiões do circuito: (i) temperatura interna da caixa de aquecimento, (ii) temperatura na entrada da água, (iii) temperatura intermediária entre os dois estágios do aquecedor e (iv) temperatura de saída.

A aquisição dos sinais foi realizada por um registrador de dados modelo *Fieldlogger* (Novus), configurado com taxa de amostragem de 1 Hz. O dispositivo realizou o armazenamento contínuo em cartão SD, permitindo posterior análise temporal dos dados. Além disso, recursos internos de filtragem digital e linearização do sinal contribuíram para aumentar a confiabilidade dos resultados obtidos.

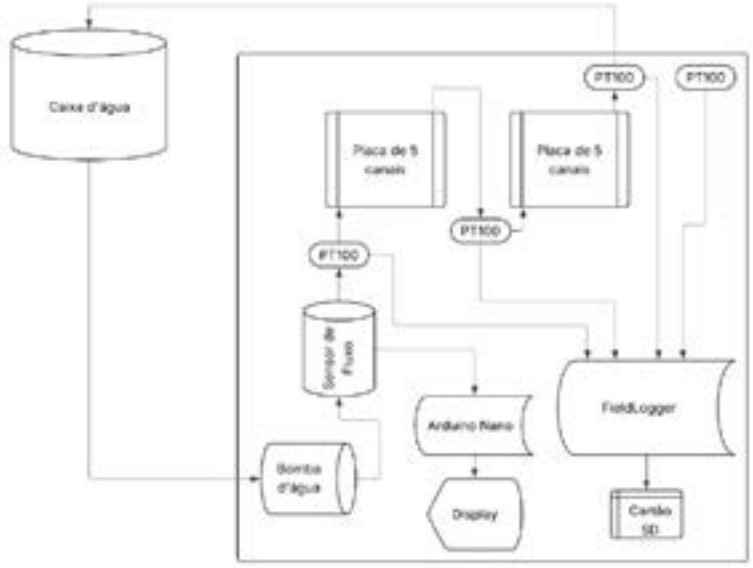


Figura 4: Esquemático de conexão do sistema de aquisição e controle.

Essa configuração possibilitou a obtenção de dados consistentes para a avaliação da eficiência térmica do sistema, integrando medições de vazão e temperatura em pontos críticos do processo, de modo a fornecer subsídios técnicos para a análise do desempenho energético e da eficácia da configuração em dois estágios

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção apresenta e discute os resultados de simulação e os dados de campo obtidos.

3.1 SIMULAÇÃO

Os resultados numéricos foram validados por meio da comparação com dados experimentais obtidos no dia 18 de setembro de 2025 às 12h45, período selecionado por corresponder ao pico de irradiação solar local (~977 W/m²). Essa condição crítica foi intencionalmente escolhida para testar a robustez do modelo, uma vez que pequenas variações nas condições de contorno ou propriedades ópticas tendem a ter maior impacto sob alta carga térmica.

Nos ensaios experimentais, a temperatura da água apresentou um aumento total de $\Delta T = 2{,}30$ K, passando de 24,44 °C na entrada para 26,74 °C na saída. Já no modelo CFD, a temperatura de entrada foi definida como 24,44 °C. Após a primeira passagem do canal serpentina, a saída numérica foi de 25,49 °C, resultando em $\Delta T_1 = 1{,}05$ K.

Essa condição foi utilizada como entrada da segunda passagem, cuja saída foi de 26,46 °C, totalizando ΔT = 2,04 K.

Assim, o modelo subestimou em 0,26 K a elevação de temperatura observada experimentalmente, o que corresponde a um erro relativo de 11,3 %. A diferença absoluta entre a temperatura de saída numérica (26,46 °C) e a experimental (26,74 °C) foi de apenas 0,28 K, valor compatível com a soma das incertezas dos sensores de temperatura (±0,1–0,2 K) e dos erros numéricos inerentes ao modelo.

Caso	Entrada T (ºC)	Saída T (ºC)	ΔT (K)	Desvio (K)	Erro Relativo (%)
Experimental	24,44	26,74	2,30		
CFD – Passe 1	24,44	25,49	1,05		
CFD – Passe 2 (total)	25,49	26,46	0,97 (2,02)	-0,26	11.3

Tabela 2 - Comparação entre resultados experimentais e numéricos.

Essa proximidade entre os resultados reforça a consistência e aplicabilidade do modelo CFD para representar o comportamento térmico global do coletor solar, mesmo sob condições extremas de operação. A Figura 5 apresenta o resultado da simulação numérica, destacando o campo de temperatura na superfície da placa absorvedora (parte superior) e as trajetórias de escoamento do fluido (parte inferior).

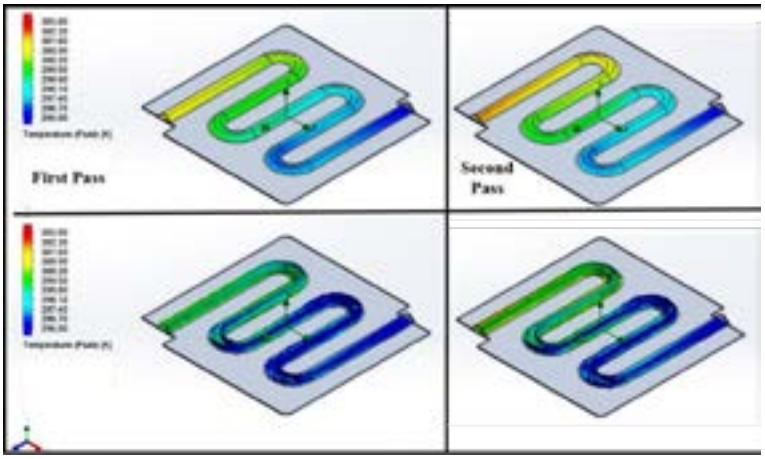


Figura 5 - Resultados numéricos de simulações CFD (gráfico de superfície na metade superior e trajetória de fluxo na metade inferior).

3.2 COLETA DE DADOS EM CAMPO

A coleta de dados experimentais em campo foi realizada no campus do Centro Universitário UniSATC em estrutura de madeira confeccionada em madeira para acomodação do coletor solar com ângulo de 29 º em relação ao solo e com direção para o ponto cardeal norte. Como fonte de água foi utilizada uma caixa d'água de 310 L com altura da saída de líquido sendo a mesma da entrada de água no coletor térmico e a saída retornando à caixa d'água. O local e instalação do experimento é apresentado na Figura 6.

Figura 6: Local e instalação do coletor solar.

A coleta de dados ocorreu nos dias 18 e 19 do mês de setembro de 2025. Durante o dia 18/09 a coleta de dados ocorreu das 10 horas da manhã às 17 horas. Os dados coletados da temperatura interna da caixa do coletor térmico, temperatura da água antes da primeira placa coletora, a temperatura entre as duas placas coletores e a temperatura de saída do coletor térmico são apresentadas na Figura 7.

Durante o período maior diferença de temperatura entre a entrada e saída foi de ΔT = 3,6 K, entre as a primeira placa e entre as placas coletores de ΔT_1 =1,9 K e entre as placas coletores e a saída de ΔT_2 =1,8 K. Durante o periodo de 12:45 e 13:00 houve uma abertura no vidro do coletor térmico para verificação do funcionamento, gerando a queda da temperatura vista na figura após o 44.000º segundo.

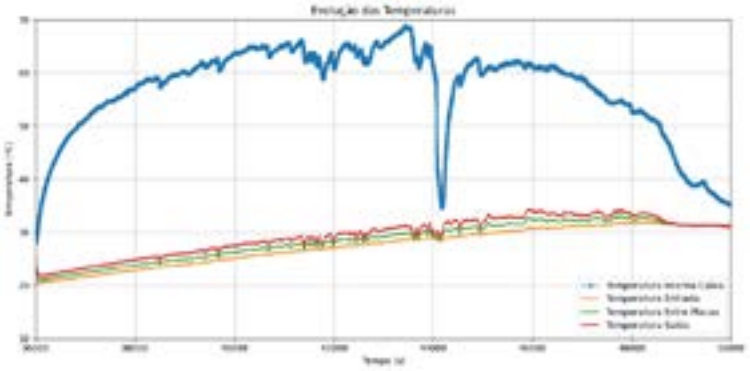


Figura 7: Coleta de dados da temperatura no coletor térmico no dia 18/09/2025

Para fim de comparação com a geração do coletor térmico, na Figura 8 é apresentado o dado de irradiação solar no mesmo período de tempo no dia 18/09/2025.

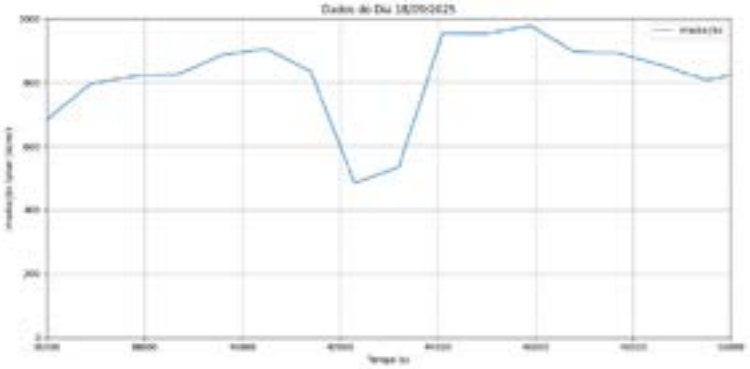


Figura 8: Irradiação solar no campus UniSATC no dia 18/09/2025.

Durante o dia 19/09 a coleta de dados ocorreu das 8:30 horas da manhã às 16:00. Os dados coletados têm a mesma configuração anterior (Figura 9).

Durante o período maior diferença de temperatura entre a entrada e saída foi de ΔT = 4,29 ºC, entre as a primeira placa e entre as placas coletores de ΔT_1 = 2,8 ºC e entre as placas coletores e a saída de ΔT_2 = 2,2 ºC. Durante o período de 46.000 e 47.500 houve discrepâncias de dados de geração não identificados, os quais foram retirados da análise de dados.

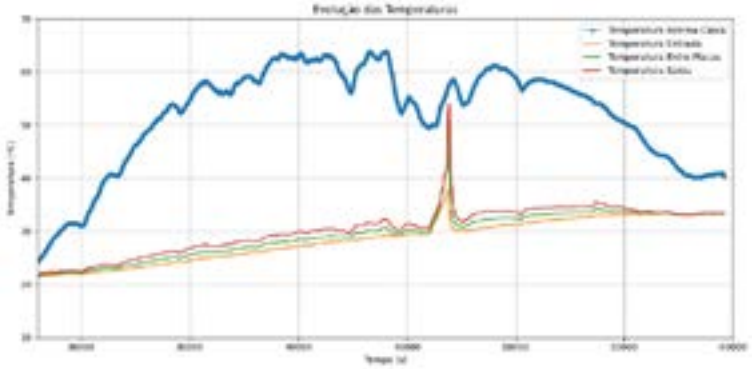


Figura 9: Coleta de dados da temperatura no coletor térmico no dia 19/09/2025

Para fim de comparação com a geração do coletor térmico, na Figura 10 é apresentado o dado de irradiação solar no mesmo período de tempo do dia 19/09/2025.

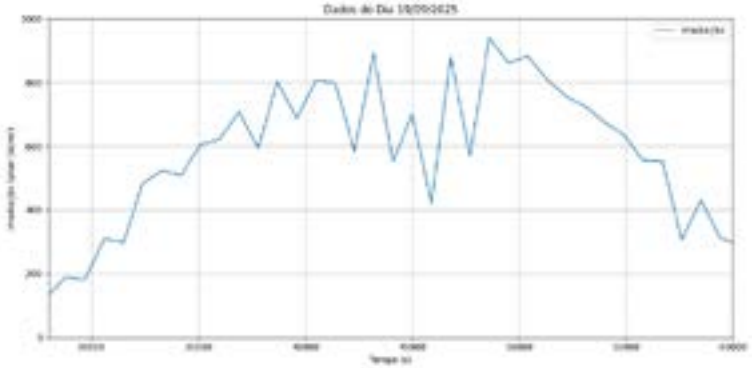


Figura 10: Irradiação solar no campus UniSATC no dia 19/09/2025.

3.3 DISCUSSÕES

A análise conjunta dos resultados de simulação e experimentais mostra uma boa correlação entre o modelo numérico e os ensaios de campo para o coletor solar fabricado por estampagem incremental. A diferença máxima observada entre os valores de saída foi de 0,28 K, evidenciando que o modelo CFD simplificado, ainda que desconsiderando as perdas locais em conexões e curvas, foi capaz de representar adequadamente o desempenho térmico global do sistema.

Nos testes em campo, registrou-se um aumento de temperatura entre 3,6 °C e 4,29 °C entre a entrada e a saída do coletor, valores superiores ao observado na condição isolada de comparação com a simulação (2,30 °C). Essa diferença é atribuída a fatores não modelados numericamente, como a estratificação térmica do ar na caixa, a inércia térmica dos materiais, perdas radiativas adicionais nas paredes laterais e variações transitórias da irradiação solar. Ainda assim, a tendência de elevação da temperatura e o perfil térmico medido nos pontos de monitoramento confirmam o comportamento previsto pelo modelo.

Outro ponto relevante é que a simulação CFD foi conduzida sob a condição de pico de irradiação (977 W/m²), o que representa o cenário mais crítico de operação. Nessas condições, pequenas discrepâncias de propriedades ópticas do vidro ou da

pintura da placa absorvedora impactam de forma ampliada a resposta térmica. Mesmo assim, o erro relativo permaneceu inferior a 12%, valor considerado aceitável em estudos experimentais de coletores solares.

Os resultados também reforçam a viabilidade técnica do uso da estampagem incremental como processo de fabricação das placas absorvedoras. A geometria conformada dos canais, além de simplificar a montagem e reduzir custos em relação às tubulações de cobre, mostrou-se capaz de assegurar uma transferência de calor eficiente. Tanto a simulação quanto os ensaios indicaram que a configuração em múltiplos canais proporcionou ganhos de desempenho, confirmando o potencial da tecnologia para aplicações em escala maior.

Portanto, pode-se afirmar que a integração entre simulação CFD e validação experimental foi fundamental para demonstrar a confiabilidade do modelo e a eficácia do conceito proposto. A concordância entre os resultados respalda a continuidade do desenvolvimento do sistema, incluindo estudos de otimização geométrica dos canais, avaliação de novos materiais e análises de desempenho em condições climáticas distintas.

4. CONCLUSÃO

O presente estudo demonstrou a viabilidade técnica da aplicação da estampagem incremental na fabricação de placas absorvedoras para coletores solares planos. A utilização de chapas de alumínio conformadas diretamente com canais de circulação mostrou-se uma alternativa promissora às tubulações de cobre tradicionais, reduzindo custos de produção e simplificando a montagem sem comprometer a eficiência térmica do sistema.

A integração entre simulações CFD e ensaios experimentais confirmou a consistência dos resultados. O modelo numérico reproduziu com boa aproximação o comportamento térmico global do coletor, apresentando diferença máxima de apenas 0,28 K em relação aos dados de campo, mesmo sob condições de irradiação solar máxima. Essa correlação evidencia a confiabilidade da abordagem adotada e valida o uso da simulação como ferramenta de apoio no projeto e otimização de coletores solares.

Os ensaios em campo reforçaram o potencial do sistema, registrando aumentos de temperatura superiores a 4 °C entre a entrada e a saída da água, o que comprova a eficiência da transferência de calor nas placas conformadas. Esses resultados apontam para a viabilidade de implementação em aplicações residenciais e comerciais, contribuindo para ampliar o uso de soluções renováveis no aquecimento de água.

Conclui-se, portanto, que o emprego da estampagem incremental para a fabricação de coletores solares planos não apenas é tecnicamente viável, mas também abre perspectivas para otimizações futuras, como a exploração de diferentes geometrias de canais, o uso de materiais alternativos e a adaptação a diferentes condições climáticas. Dessa forma, o estudo reforça o papel da manufatura inovadora no desenvolvimento de tecnologias acessíveis e sustentáveis para o setor de energia solar térmica.

AGRADECIMENTO

Agradecemos à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação de Santa Catarina (FAPESC), Edital 27/2021 | TR 2021TR001824, pelo apoio financeiro que tornou possível esta pesquisa.

REFERÊNCIAS

[1] PEREIRA R. C., SHIOTA R. T. S., MELLO S. F. M., ASSIS V. J., J. R. BARTOLI, **Eficiência térmica de coletores solares de baixo custo - CSBC**, Novembro 2006.

[2] INPE I. N. d. P. E., **Atlas brasileiro de energia solar**, 2.ed ed., São José dos Campos - SP, 2017.

[3] **Energia solar no Brasil: resumo do mercado em 2025!.** Órigo Energia. Janeiro de 2025. Disponível em: https://origoenergia.com.br/blog/energia/energia-solar-no-brasil/

[4] DUFFIE J. A., BECKMAN W. A., **Solar Engineering**, 4th Edition. ed., I. H. N. J. John Wiley & Sons, Ed., 2013.

[5] TAVARES L. D. O., DIMBARRE V. V., BIGLIA F. M., CRUZ F. B. C., SANTOS P. H. D. D., ALVES T. A., **Análise Experimental do Desempenho Térmico de um Coletor Solar do Tipo Placa Plana**, vol. 13º, Conbrepro - Comgresso brasileiro de Engenharia de Produção, 2023.

[6] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE, Atlas da Eficiência Energética Brasil/2021 - Relatório de indicadores. Acessado em outubro de 2025. Disponível em: https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/atlas-da-eficiencia-energetica-brasil-2021

[7] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE, Ações Norteadoras para o avanço da Eficiência Energética no Brasil – dezembro de 2024. Acessado em outubro de 2025. Disponível em: https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/mme-e-epe-apresentaram-estudos-com-acoes-norteadoras-para-promover-o-avanco-da-eficiencia-energetica-no-brasil/copy3_of_CadernoAesNorteadorasdeEficinciaEnergticanoBrasil_siteVF.pdf

[8] MARCH, G.; PINHEIRO, W. C.; FRITZEN, D.; DALEFFE. A.; CASTELAN, J. **Estudo do Processo de Estampagem Incremental em Chapas de Alumínio para uso em Aquecedor Solar.** Revista Vincci – Periódico Científico da UniSATC, v. 8, n. 2, p. 446-468, jul./dez., 2023. Disponível em: https://doi.org/10.70185/2525-6025.2023.v8.339

[9] ARRUDA R. P. **Estampagem incremental na Conformação de Chapas para Fabricação de Coletores Solares Planos.** UFRGS - Tese de Doutorado. Porto Alegre 2010

[10] TAVARES, L. O.; DIMBARRE, V. V.; BIGLIA, F. M.; CRUZ. F. B. C.; SANTOS, P. H. D. D.; ALVES, T. A. **Análise Experimental do Desempenho Térmico de um Coletor Solar do Tipo Placa Plana,** vol. 13º, Conbrepro - Comgresso brasileiro de Engenharia de Produção, 2023.

[11] LEITAO, J. M. D. M.; MACAGNAN, M. H.; ROCHA, T. L. A. C. **Estudo de Materiais Poliméricos para a Aplicação em Coletores Solares Planos**. VII Congresso Brasileiro de Energia Solar - CBENS , Gramado- RS, 2018.

[12] NETO, M. C. M.; GOMES, I. R. B.; SOUZA, L. G. M.; JUNIOR, Z. J. S.; OLIVEIRA, E. V. **Aplicação de Materiais Alternativos para o uso da Energia Solar,** Holos, vol. 04, pp. 212-223, 2014.

[13] B. NORTON, **Solar Energy Thermal Technology,** 1992, p. 279.

[14] NETO, J.H.M.; MOREIRA, S.; DOMINGOS, S.F.; MAIO, V. R. S.; PEDREIRA, S. M. **Análise técnica e econômica de coletores solares de baixo custo e convencionais utilizados para aquecimento de água de banho.** II Congresso Brasileiro de Energia Solar e III Conferência Regional Latino-Americana da ISES - Florianópolis, 18 a 21 de novembro de 2008.

[15] GUERRA, M. I. S.; VARELLA, F. K. O. M. Análise do desempenho térmico de um sistema de aquecimento solar de baixo custo na cidade de Mossoró (RN). HOLOS, Ano 30, Vol. 4. Disponível em: DOI: 10.15628/holos.2014.1266

[16] LORA, F. A.; BRITO, J. M.; FRITZEN, D. **Estudo do processo de estampagem incremental para aplicação na fabricação de placas absorvedoras de calor.** 39th SENAFOR. Outubro de 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/336513672_Estudo_do_processo_de_estampagem_incremental_para_aplicacao_na_fabricacao_de_placas_absorvedoras_de_calor

[17] LORA, F. A.; SOUZA, N.; FIGUEIREDO, É. G.; DAMM, D. D.; ALMEIDA, K. F.; PEREIRA, J. S. **Estudo comparativo de configurações para um coletor solar experimental.** Revista Contribuciones a las Ciências Sociales**.** São José dos Pinhais, v.16, n.6, p. 3401-3414, 2023. Disponível em: DOI: 10.55905/revconv.16n.6-021

[18] ARA, P, J. S.; SOWMY, D. S. **Análise Térmica de Coletor Solar Plano via Simulação CFD validada Experimentalmente por Teste em Simulador Solar.** VIII Congresso Brasileiro de Energia Solar – Fortaleza, 01 a 05 de junho de 2020.

[19] CARVALHO, F. R.; SIONEK, M. C. **Análise da Eficiência de um Coletor Solar Plano.** Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

[20] FREITAS, D. L. A. **Caracterização Numérica e experimental de um Coletor Solar de Placa Plana.** Dissertação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa – Paraíba, abril de 2017.

[21] MAIA, J. M. B.; PEREIRA, B. G. ; LORA, F. A. . **Materiais como alternativa para uso em Coletores Solares / Materials as an alternative for use in Solar Collectors.** Brazilian Applied Science Review, v. 4, p. 2895-2903, 2020.

[22] PILKINGTON, for Solar Applications. Acessado em setembro de 2025. Disponível em: https://www.pilkington.com/en/us/products/product-categories/solar-energy/pilkington-optiwhite-for-solar-applications?utm_source=chatgpt.com#

[23] KHOUKHI,M.; MARUYAMA, S. **Theoretical approach of a flat plate solar collector with clear and low-iron glass covers taking into account the spectral absorption and emission within glass covers layer.** Renewable Energy, v. 30, edição 8, July 2005, p. 1177-1194. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.renene.2004.09.014

[24] KHOUKHI,M.; MARUYAMA, S.; SAKAI, S. **Non-gray calculation of plate solar collector with low iron glazing taking into account the absorption and emission with a glass cover.** Desalination v. 209, edição 1–3, 30 April 2007, Pages 156-162. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.04.025

44º SENAFOR

28ª Conferência Internacional de Forjamento - Brasil
14ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas / 11º Congresso do BrDDRG
14ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis
3ª Conferência Internacional de Inovação em Materiais e Manufatura
Porto Alegre, RS, dias 1, 2 e 3 de outubro de 2025
www.senafor.com

RESISTÊNCIA AO DESGASTE POR FRICÇÃO OSCILATÓRIA DO AÇO MICROLIGADO AO VANÁDIO DIN 38MnVS6 NAS CONDIÇÕES A SECO E LUBRIFICADO COM LÍQUIDO IÔNICO

Sergio Henrique Leite Aita [1]
Vinicius Demétrio da Silva [2]
Marcus Seferin [2]
Carlos Alexandre dos Santos [1]

(1) Laboratório de Materiais, Escola Politécnica, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS, Brasil.
(2) Laboratório de Química Industrial, Escola Politécnica, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS, Brasil.

RESUMO

Este trabalho investigou a resistência ao desgaste por fricção oscilatória do aço microligado DIN 38MnVS6 sob condições a seco e com lubrificação por líquido iônico [TBA][SLES]. As amostras foram submetidas à normalização, têmpera e revenimento a 300°C e 550°C, caracterizadas por microscopia ótica, microscopia eletrônica e ensaios tribológicos HFRR (cargas 2-10 N, 500 m, 50 Hz, 25-60°C). A seco, os coeficientes de atrito variaram entre 0,18-0,94, com a condição temperada e revenida a 550°C (319 HV) apresentando melhor desempenho tribológico. Com lubrificação, o coeficiente de atrito reduziu para 0,014-0,020 (>98% de redução) independente da microestrutura. A espectroscopia Raman revelou magnetita, hematita e carbono amorfo (ID/IG: 1,027-1,066). A 60°C, identificou-se um filme tribológico dinâmico autorregenerativo que manteve o CoF estável em 0,016. Os resultados demonstram que o líquido iônico constitui uma alternativa eficiente aos lubrificantes convencionais.

Palavras-Chave: Aço Microligado DIN 38MnVS6, Tratamentos Térmicos, Microestruturas, Resistência ao Desgaste, Líquido Iônico.

1. INTRODUÇÃO

Os aços microligados *High-Strength Low-Alloy* (HSLA) são uma classe de materiais de engenharia que têm recebido atenção crescente devido à sua combinação única de alta resistência mecânica, boa tenacidade e soldabilidade, obtida com pequenas adições de elementos de liga como vanádio (V), nióbio (Nb) e titânio (Ti) [1]. Esses elementos, em teores que raramente ultrapassam 0,15% em peso, formam precipitados de carbonetos, nitretos ou carbonitretos, que são extremamente eficazes no refino de grão e no endurecimento por precipitação [2], [3]. O aço DIN 38MnVS6, objeto deste estudo, é um exemplo representativo dessa classe de material, sendo amplamente utilizado em componentes mecânicos que exigem alta resistência à fadiga e ao desgaste, como virabrequins, eixos e engrenagens [4], [5]. A otimização do desempenho desses componentes passa, invariavelmente, pelo entendimento e controle dos fenômenos tribológicos que ocorrem em serviço. A tribologia, o estudo do atrito, do desgaste e da lubrificação, é fundamental para garantir a eficiência, a durabilidade e a confiabilidade de sistemas mecânicos [6], [7]. O desgaste, em particular, é um dos principais fatores que limitam a vida útil de componentes, gerando custos significativos de manutenção e substituição [8]. Nesse contexto, a busca por soluções de lubrificação mais eficazes e sustentáveis é um desafio constante para a engenharia, surgindo então os líquidos iônicos (LIs), como uma alternativa promissora aos lubrificantes convencionais à base de óleo mineral.

Compostos inteiramente por íons, os LIs possuem propriedades notáveis como pressão de vapor praticamente nula, alta estabilidade térmica e química, e a capacidade de formar filmes triboquímicos altamente protetores nas superfícies metálicas [9], [10]. Estudos recentes têm demonstrado o potencial dos LIs para reduzir drasticamente o atrito e o desgaste em diversos sistemas tribológicos [11], [13], [14]. O líquido iônico Lauril Éter Sulfato de Tetrabutilamônio [TBA][SLES], utilizado nesta pesquisa, é um exemplo de LI com potencial para aplicações em lubrificação, devido à sua estrutura anfifílica e capacidade de interagir com superfícies metálicas [15]. Este trabalho investigou a resistência ao desgaste por fricção oscilatória do aço DIN 38MnVS6 em diferentes condições de tratamento térmico (normalizado, temperado e revenido a 300°C e 550°C), comparando o desempenho a seco e com lubrificação pelo líquido iônico [TBA][SLES]. O objetivo é correlacionar a microestrutura e a dureza do aço com seu comportamento tribológico, avaliando a eficácia do líquido iônico na redução do atrito e do desgaste.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para este estudo foi utilizado o aço microligado DIN 38MnVS6, fornecido em barras cilíndricas laminadas a quente com diâmetro de 36,51 mm. A composição química do material foi determinada por espectrometria de emissão óptica, estando em conformidade com a norma [5], o que validou a amostra.

As barras foram usinadas e tiveram suas dimensões reduzidas para 9,8 mm de diâmetro e 45 mm de comprimento e posteriormente foram submetidas a três tratamentos térmicos distintos. Todas as amostras foram inicialmente austenitizadas a 860°C por 15 minutos, seguindo-se os tratamentos específicos: Normalização com resfriamento ao ar (N); Têmpera em óleo seguida de revenimento a 550°C por 15 minutos (TR_550); e Têmpera em óleo seguida de revenimento a 300°C por 15 minutos (TR_300). Após os tratamentos térmicos, os corpos de prova foram usinados em discos de 5 mm de espessura e caracterizados microestruturalmente por microscopia óptica (MO).

A dureza foi medida utilizando um microdurômetro Vickers (HV0,2) e um durômetro Rockwell (HRC), sendo os ensaios tribológicos realizados em um tribômetro reciprocante de alta frequência (HFRR), conforme a norma ASTM G133 (ASTM G133, 2016), utilizando uma esfera de zircônia (ZrO_2) de 6 mm de diâmetro como contra-corpo. Os parâmetros de ensaio foram: frequência de 50 Hz, deslocamento de 1 mm, distância total de 500 m, cargas normais de 2 N e 10 N a 25°C.

Os ensaios tribológicos foram conduzidos a seco e com lubrificação, utilizando o líquido iônico [TBA][SLES] e temperatura ambiente de 25°C. Para os ensaios lubrificados, duas gotas do LI foram aplicadas na interface de contato. Adicionalmente, uma amostra TR_550 lubrificada foi ensaiada a 60°C para avaliar o efeito do aumento da temperatura. As pistas de desgaste foram analisadas por MEV para investigar a morfologia e os mecanismos de desgaste. O volume de material removido foi calculado a partir de perfis 3D das pistas de desgaste. A composição química das superfícies desgastadas foi analisada por espectroscopia Raman para identificar a formação de tribofilmes e produtos de oxidação. A análise Raman focou na identificação das bandas de carbono (D e G) e de óxidos de ferro (magnetita e hematita), utilizando a relação de intensidade ID/IG para avaliar o grau de desordem estrutural do carbono formado [16].

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Caracterização do Material

Os tratamentos térmicos resultaram em diferentes microestruturas e durezas, como esperado. A condição Normalizada (N) apresentou uma microestrutura ferrítico-perlítica com dureza de 293 HV, o tratamento TR_550 resultou em martensita revenida com dureza de 319 HV, enquanto o tratamento TR_300 produziu uma martensita revenida mais fina e com maior dureza, 537 HV. A microestrutura do material em estado bruto foi caracterizada como ferrítico-perlítica, com dureza de 354 HV, indicando algum grau de encruamento do processo de laminação a quente.

3.2. Análises Tribológicas

Os ensaios de desgaste por fricção oscilatória revelaram a influência significativa tanto do tratamento térmico quanto da lubrificação. A Figura 1 apresenta os coeficientes de atrito (CoF) médios para as diferentes condições e carga de 10 N.

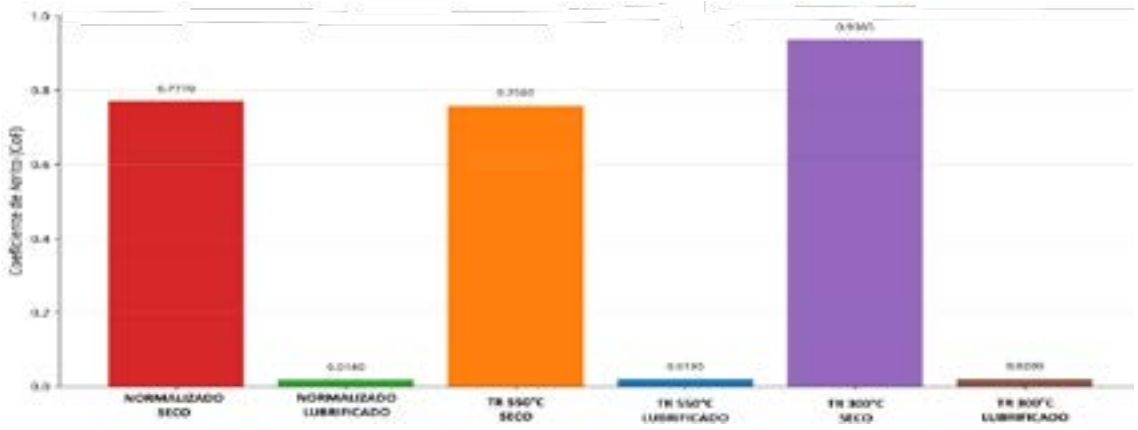


Figura 1: Coeficiente de Atrito Médio sob Carga de 10 N [elaborado pelo autor]

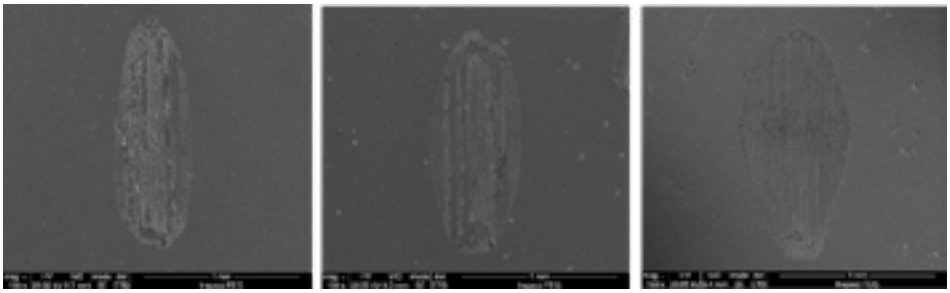
Na condição a seco, o CoF foi elevado para todos os tratamentos, variando entre 0,76 e 0,94, o que é típico de contato direto, a amostra TR_300, de maior dureza (537 HV), apresentou o maior CoF (0,94), enquanto o TR_550 apresentou o menor CoF a seco (0,76).

A introdução do líquido iônico [TBA][SLES] como lubrificante causou uma redução drástica e imediata do CoF para valores entre 0,018 e 0,020 em todas as condições, como pode ser observado na Tabela 1, evidenciando a formação de um filme lubrificante eficaz na interface. Esta redução representa uma diminuição de mais de 98% no coeficiente de atrito comparado às condições a seco.

Tabela 1: Comparativos entre os resultados tribométricos [elaborado pelo autor].

Amostra (Tratamento)	Condição de Ensaio	Carga Aplicada (N)	CoF (médio)	Desvo Padrão	Micro dureza (HV)	Volume Removido (μm^3)	Taxa média de desgaste ($x10^{-12}$ $mm^3/N*m$)
Normalizado (N)	Seco	10	0,771	±0,021	293	70500	14,10
TR_550	Seco	10	0,758	±0,035	319	60000	12,00
TR_300	Seco	10	0,937	±0,004	537	103000	20,60
Normalizado (N)	Lubrificado	10	0,018	±0,000	293	NA	NA
TR_550	Lubrificado	10	0,020	±0,001	319	NA	NA
TR_550	Lubrificado 60°C	10	0,016	±0,003	319	8	1,56
TR_300	Lubrificado	10	0,020	±0,000	537	NA	NA

As imagens de MEV das pistas de desgaste a seco podem ser vistas na Figura 2 e revelaram mecanismos de desgaste severo, como adesão, riscamento e delaminação.

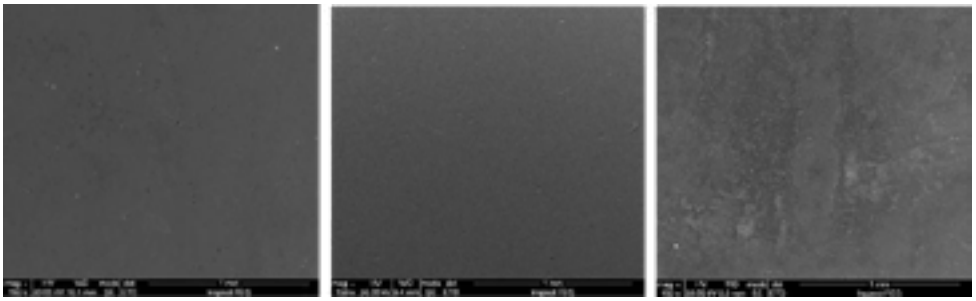


(a) (b) (c)

Figura 2: Imagem MEV das pistas de desgaste, amostras ensaiadas a seco: normalizado (a), TR_550 (b), TR_300 (c)

Já o volume de desgaste nas condições lubrificadas foi praticamente nulo, não sendo mensurável com a técnica utilizada. As imagens de MEV das pistas de desgaste lubrificadas disponíveis na Figura 3, mostram superfícies muito mais lisas, com poucos sinais de desgaste, confirmando a eficácia protetora do LI.

O comportamento tribológico pode ser comparado nos gráficos apresentados nas Figuras 4-6.



(a) (b) (c)

Figura 3: Imagem MEV das pistas de desgaste nas amostras lubrificadas: normalizado (a), TR_550 (b), TR_300 (c)

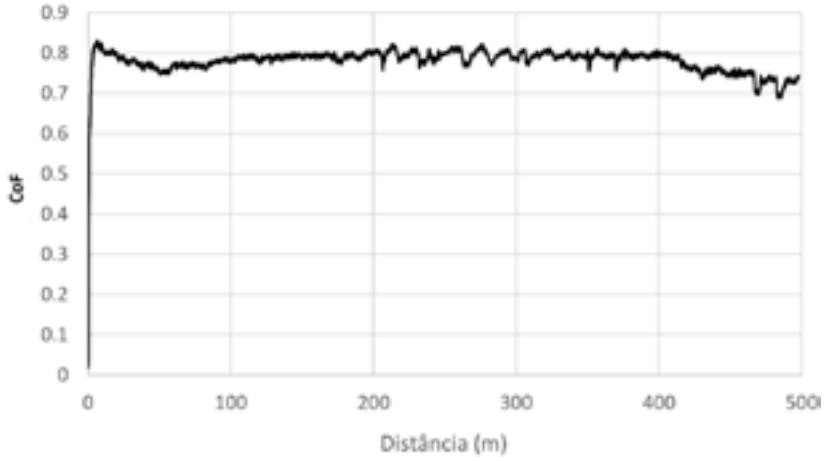


Figura 4: Gráfico do corpo de prova TR_550 na condição a seco, carga 10 N, 25°C

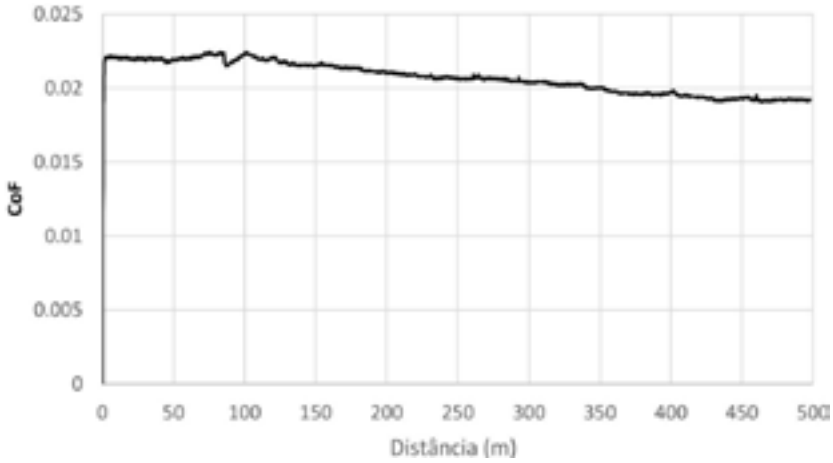


Figura 5: Gráfico do corpo de prova TR_550 na condição lubrificada, carga 10 N, 25°C

A amostra TR_550 na condição lubrificado e com temperatura de 60°C, mostrou um comportamento de atrito com um CoF de 0,016, ligeiramente inferior ao do ensaio a 25°C, cujo CoF foi de 0,020. Este resultado sugere que o líquido iônico mantém sua capacidade de lubrificação em temperaturas mais elevadas, o que é uma característica desejável para muitas aplicações industriais [9]. Entretanto, a análise detalhada da curva de atrito revelou maior instabilidade no comportamento tribológico a 60°C, com flutuações mais pronunciadas ao longo do ensaio, indicando possíveis ciclos de ruptura e rearranjo do tribofilme. Esta instabilidade sugere que, embora o líquido iônico mantenha sua eficácia lubrificante em temperaturas elevadas, o

mecanismo de proteção torna-se mais dinâmico, com formação intermitente de filmes triboquímicos que se reconstroem continuamente durante o deslizamento, caracterizando um sistema de autorreparação ativo [9], [11], [12].

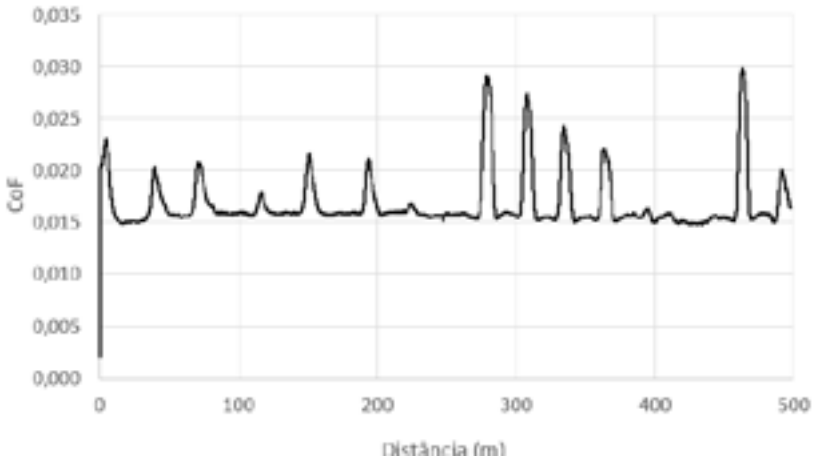


Figura 6: Gráfico do corpo de prova TR_550 na condição lubrificada, carga 10 N, 60°C

3.3. Análise por Espectroscopia Raman

A análise das pistas de desgaste por espectroscopia Raman forneceu informações valiosas sobre a composição química da superfície e a natureza do tribofilme.

Os espectros revelaram a presença intensa de óxidos de ferro, como hematita (α-Fe_2O_3) e magnetita (Fe_3O_4), além de bandas de carbono desordenado (bandas D e G). A alta intensidade dos picos de óxido indica um processo de desgaste oxidativo em todas as situações [18], [19]. A relação ID/IG do carbono sugere a formação de carbono amorfo com alto grau de desordem estrutural, resultante da degradação de carbono presente na própria liga e/ou contaminação atmosférica [16], [17]. Na Tabela 2, pode-se observar a relação ID/IG frente ao grau de desordem do carbono e o índice de oxidação para cada condição experimental.

Tabela 2: Análise Raman. Grau de desordem de carbono e formação de óxidos.

Condição Experimental	Relação ID/IG Média ±DP	Grau de Desordem	Índice de Oxidação Média±DP
TR_550_Seco_10N_25°C	1,066 ± 0,046	Maior	0,461 ±0,134
TR_550_Lub_10N_25°C	1,043 ± 0,022	Intermediário	0,756 ±0,138
TR_550_Lub_10N_60°C	1,027 ± 0,012	Menor	0,639 ±0,258

Nas condições lubrificadas, a relação ID/IG diminuiu, indicando a formação de um carbono mais ordenado. Acredita-se que este carbono, juntamente com compostos derivados da decomposição parcial do próprio líquido iônico, compõe o tribofilme protetor [20], [21]. A análise a 60°C mostrou uma relação ID/IG ainda menor (1,027), sugerindo que a temperatura mais elevada pode favorecer a formação de um tribofilme mais organizado, explicando o excelente desempenho lubrificante observado nessa condição.

4. CONCLUSÕES

Este estudo evidenciou uma forte correlação entre o tratamento térmico, a microestrutura e o desempenho tribológico do aço DIN 38MnVS6 sob fricção oscilatória. A têmpera seguida de revenimento a 550°C (TR_550) proporcionou uma dureza de 319 HV e a maior resistência ao desgaste em condições de ensaio a seco, onde atuam os mecanismos de desgaste abrasivo e adesivo. O líquido iônico [TBA][SLES] mostrou-se eficaz na mitigação do atrito e do desgaste, para todas as condições. O coeficiente de atrito foi significativamente reduzido, passando de valores superiores a 0,9 (a seco) para menos de 0,016 com lubrificação, enquanto o desgaste volumétrico foi praticamente eliminado.

A espectroscopia Raman revelou a formação de um tribofilme protetor nas superfícies lubrificadas, composto por carbono mais ordenado e produtos de decomposição do líquido iônico, que atuou como uma barreira contra o contato direto entre superfícies metálicas, mas não impediu os processos de oxidação das superfícies. Além disso, o líquido iônico manteve boa lubrificação mesmo a 60°C, demonstrando estabilidade térmica.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq (Processo 310624/2021-5), FAPERGS (Processo 24/2551-0001259-1), FINEP (Processo 01.17.0047.00/0082-16) e a PUCRS pelo apoio e disponibilidade de infraestrutura.

REFERÊNCIAS

[1] DeArdo, A. J. (2001). Niobium in modern steels. International Materials Reviews, 46(4), 179-206.

[2] Gladman, T. (1997). The Physical Metallurgy of Microalloyed Steels. The Institute of Materials, London.

[3] Palmiere, E. J., Garcia, C. I., & DeArdo, A. J. (1994). Compositional and microstructural changes which attend reheating and grain coarsening in steels containing niobium. Metallurgical and Materials Transactions A, 25(2), 277-286.

[4] Ovako. (2025). 38MnVS6 - Steel Navigator. Disponível em: https://steelnavigator.ovako.com/steel-grades/38mnvs6/.

[5] Steel Number. (2025). 38MnVS6 / 1.1303 - Chemical composition, equivalent, properties. Disponível em: http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=1916.

[6] Stachowiak, G.W., & Batchelor, A.W. (2014). Engineering Tribology. 4th ed. Butterworth-Heinemann, Oxford.

[7] Hutchings, I.M. (1992). Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials. Edward Arnold, London.

[8] Holmberg, K., & Erdemir, A. (2017). Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions. Friction, 5(3), 263-284.

[9] Minami, I. (2009). Ionic liquids in tribology. Molecules, 14(6), 2286-2305.

[10] Zhou, F., Liang, Y., & Liu, W. (2009). Ionic liquid lubricants: designed chemistry for engineering applications. Chemical Society Reviews, 38(9), 2590-2599.

[11] Bermúdez, M. D., Jiménez, A. E., Sanes, J., & Carrión, F. J. (2009). Ionic liquids as advanced lubricant fluids. Molecules, 14(8), 2888-2908.

[12] Somers, A. E., Howlett, P. C., MacFarlane, D. R., & Forsyth, M. (2013). A review of ionic liquid lubricants. Lubricants, 1(1), 3-21.

[13] Qu, J., Blau, P. J., Dai, S., Luo, H., & Meyer III, H. M. (2009). Ionic liquids as novel lubricants and/or additives for tribological applications. Tribology Letters, 35(3), 181-189.

[14] Jiménez, A. E., Bermúdez, M. D., Iglesias, P., Carrión, F. J., & Martínez-Nicolás, G. (2006). 1-N-alkyl-3-methylimidazolium ionic liquids as neat lubricants and lubricant additives in steel–aluminium contacts. Wear, 260(7-8), 766-782.

[15] Vieira, M., et al. (2017). Ionic liquids composed of linear amphiphilic anions: Synthesis, physicochemical characterization, hydrophilicity and interaction with carbon dioxide. Journal of Molecular Liquids, 241, 64–73.

[16] Ferrari, A. C., & Robertson, J. (2000). Interpretation of Raman spectra of disordered and amorphous carbon. Physical Review B, 61(20), 14095–14107.

[17] Zhang, L., Wang, J., Chen, X., Liu, Y., & Wang, H. (2018). Behavior of Wear Debris and Its Action Mechanism on the Tribological Properties of Medium-Carbon Steel with Magnetic Field. Materials, 12(1), 45.

[18] Quinn, T. F. J. (1983). Review of oxidational wear Part I: The origins of oxidational wear. Tribology International, 16(5), 257-271.

[19] Godet, M. (1984). The third-body approach: A mechanical view of wear. Wear, 100(1-3), 437-452

[20] Cai, M., Liang, Y., Yao, M., Xia, Y., Zhou, F., & Liu, W. (2006). Imidazolium ionic liquids as antiwear and antioxidant additive in poly (ethylene glycol) for steel/steel contacts. ACS Applied Materials & Interfaces, 2(3), 870-876.

[21] Palacio, M., & Bhushan, B. (2010). A review of ionic liquids for green molecular lubrication in nanotechnology. Tribology Letters, 40(2), 247-268.

OSCILLATORY FRICTION WEAR RESISTANCE OF VANADIUM MICROALLOYED STEEL DIN 38MNVS6 IN DRY AND IONIC LIQUID LUBRICATED CONDITIONS

This work compares the oscillatory friction wear resistance of microalloyed DIN 38MnVS6 steel under dry and lubricated conditions using the ionic liquid [TBA][SLES].The samples were subjected to normalization, quenching, and tempering at 300°C and 550°C. Microstructural characterization was performed via optical microscopy, scanning electron microscopy (SEM), and tribological testing using the High-Frequency Reciprocating Rig (HFRR) under loads ranging from 2 to 10 N, a distance of 500 m, frequency of 50 Hz, and temperatures between 25°C and 60°C. Under dry conditions, the coefficient of friction (CoF) ranged from 0.18 to 0.94. The quenched and tempered condition at 550°C (319 HV) exhibited superior tribological performance. When lubricated with [TBA][SLES], the CoF was significantly reduced to values between 0.014 and 0.020, representing a reduction greater than 98%, irrespective of the microstructural state. Raman spectroscopy identified the formation of magnetite (Fe_3O_4), hematite (Fe_2O_3), and amorphous carbon, with ID/IG ratios ranging from 1,027 to 1,066. At 60°C, a dynamic, self-regenerating tribofilm was observed, maintaining a stable CoF of 0.016 throughout the test duration. These findings demonstrate that the ionic liquid [TBA][SLES] is a highly effective alternative to conventional lubricants, offering substantial friction reduction and wear mitigation under oscillatory contact conditions.

Key-words: Microalloyed Steel DIN 38MnVS6, Heat Treatments, Microstructures, Wear Resistance, Ionic Liquid.

44º SENAFOR

28ª Conferência Internacional de Forjamento - Brasil
14ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas / 11º Congresso do BrDDRG
14ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis
3ª Conferência Internacional de Inovação em Materiais e Manufatura
Porto Alegre, RS, dias 1, 2 e 3 de outubro de 2025
www.senafor.com

ACIDENTES ENVOLVENDO BATERIAS AUTOMOTIVAS NO BRASIL: CAUSAS, CONSEQUÊNCIAS E MEDIDAS DE PREVENÇÃO

Eng. Fabio Bergel - Autor (1)
Marçal José Rodrigues Pires - Orientador (2)

RESUMO

A crescente adoção de veículos elétricos no Brasil impulsiona o uso intensivo de baterias de alta tensão, especialmente as de íon lítio, o que traz novos desafios à segurança operacional e elétrica. Este trabalho apresenta uma revisão sistemática sobre acidentes relacionados a baterias de carros elétricos no Brasil, com foco nas implicações para a engenharia elétrica e a segurança do trabalho. Foram analisadas publicações técnicas, boletins de ocorrência, relatórios de inspeção e normas brasileiras aplicáveis, no período de 2012 a 2024. Os principais tipos de acidentes identificados incluem incêndios por fuga térmica (*thermal runaway*), explosões, choques elétricos e falhas estruturais durante recarga, manutenção ou transporte. As causas mais frequentes envolvem curto-circuitos, falhas no sistema de gerenciamento da bateria (BMS), uso indevido de estações de recarga e ausência de protocolos de segurança. Os incidentes afetam diretamente trabalhadores de oficinas, eletricistas veiculares, socorristas e equipes de logística, demandando atualização das diretrizes das NRs 10, 12 e 20. A análise evidencia ainda a carência de capacitação técnica e de infraestrutura adequada para diagnóstico, manipulação e descarte seguro desses sistemas. Conclui-se que o avanço da eletromobilidade no país deve ser acompanhado pela ampliação das normas técnicas, fiscalização especializada e formação contínua dos profissionais envolvidos, a fim de mitigar riscos e garantir a segurança nos ambientes de trabalho.

Palavras-chave - veículos elétricos; baterias íon lítio; fuga térmica

ACCIDENTS INVOLVING AUTOMOTIVE BATTERIES IN BRAZIL: CAUSES, CONSEQUENCES, AND PREVENTIVE MEASURES

Eng. Fabio Bergel - Autor (1)
Marçal José Rodrigues Pires - Orientador (2)

ABSTRACT

The growing adoption of electric vehicles in Brazil is driving the intensive use of high-voltage batteries, especially lithium-ion batteries, which poses new challenges to operational and electrical safety. This paper presents a systematic review of accidents related to electric vehicle batteries in Brazil, focusing on the implications for electrical engineering and occupational safety. Technical publications, police reports, inspection reports, and applicable Brazilian standards were analyzed from 2012 to 2024. The main types of accidents identified include thermal runaway fires, explosions, electric shocks, and structural failures during charging, maintenance, or transportation. The most common causes include short circuits, battery management system (BMS) failures, improper use of charging stations, and a lack of safety protocols. These incidents directly affect workshop workers, vehicle electricians, first responders, and logistics teams, requiring updates to the NRs 10, 12, and 20 guidelines. The analysis also highlights the lack of technical training and adequate infrastructure for the diagnosis, handling, and safe disposal of these systems. The conclusion is that the advancement of electromobility in the country must be accompanied by the expansion of technical standards, specialized oversight, and ongoing training for professionals involved in order to mitigate risks and ensure safety in the workplace.

Key words — electric vehicles; lithium-ion batteries; thermal runaway;

1. INTRODUÇÃO

A mobilidade elétrica no Brasil está em plena ascensão, impulsionada por metas de descarbonização, incentivos à inovação tecnológica e pela busca de alternativas sustentáveis aos combustíveis fósseis. No centro dessa transformação estão as baterias de íons de lítio, protagonistas na viabilização dos veículos elétricos automotores (VEAs). Entretanto, o uso intensivo dessas baterias de alta tensão também impõe desafios críticos à engenharia elétrica e à segurança do trabalho, especialmente diante de eventos como incêndios, choques e falhas durante o ciclo de vida dos sistemas [1][2].

A crescente complexidade dos sistemas de armazenamento eletroquímico exige uma abordagem integrada, que considere não apenas os aspectos técnicos de funcionamento das células e sistemas de gerenciamento (BMS), mas também os

protocolos de manutenção, transporte, descarte e resposta a emergências. Relatórios recentes indicam que incidentes envolvendo baterias veiculares no Brasil envolvem, em sua maioria, falhas de isolamento, superaquecimento, curto-circuito interno e deficiências em infraestrutura de recarga — muitas vezes agravadas por lacunas nas normas nacionais e pela carência de capacitação técnica específica [3][4].

Esse panorama evidencia a urgência de uma revisão sistemática sobre os acidentes com baterias automotivas no contexto nacional, com foco em identificar causas, consequências e possíveis medidas preventivas. A crescente adoção de veículos elétricos no Brasil tem intensificado o uso de baterias de íons de lítio em ambientes urbanos e industriais, o que eleva o risco de acidentes por falhas técnicas ou operacionais [5].

O presente trabalho busca preencher essa lacuna ao analisar criticamente registros técnicos, boletins de ocorrência, normas regulamentadoras, como a NR 10 e a NR 12 [6][7], e dados coletados entre 2012 e 2024. A análise evidencia que falhas no sistema de gerenciamento de baterias (BMS), a ausência de protocolos de segurança e o uso inadequado de estações de recarga são fatores recorrentes em incêndios, explosões ou choques elétricos [3][4].

A abordagem adotada contribui diretamente para o aprimoramento das práticas de segurança, capacitação profissional e desenvolvimento normativo, aspectos fundamentais para a consolidação segura da eletromobilidade no Brasil [3].

2. TIPOS DE ACIDENTES COM BATERIAS VEICULARES

Entre os riscos mais críticos estão fenômenos como a fuga térmica, explosões, choques elétricos e falhas mecânicas — eventos que, se não forem devidamente controlados, podem resultar em acidentes graves, tanto para os usuários quanto para os profissionais envolvidos na cadeia de manutenção, transporte e descarte desses sistemas. Esses incidentes, muitas vezes originados por falhas internas ou abusos externos térmicos, elétricos ou mecânicos — são intensificados pela alta densidade energética das células de íons de lítio, aliada à sensibilidade dos seus componentes eletroquímicos, como o eletrólito inflamável e os materiais de eletrodo instáveis em altas temperaturas [2][9]. Nesta seção, serão analisados tecnicamente os principais mecanismos de falha das baterias automotivas, suas causas frequentes e as implicações práticas para a engenharia elétrica, a segurança do trabalho e a formulação de normas técnicas [10].

2.1 Fuga Térmica (*Thermal Runaway*)

A fuga térmica ocorre quando o aumento descontrolado da temperatura interna da célula desencadeia reações exotérmicas que se autoalimentam. Isso pode levar a incêndios ou explosões. Pesquisas apontam que o principal gatilho é o aumento localizado de temperatura acima de 80 °C, associado a falhas de resfriamento, sobrecarga e curtos-circuitos internos [2].

2.2 Explosões e Combustão Espontânea

Explosões geralmente estão ligadas à liberação abrupta de gases inflamáveis gerados durante a decomposição dos eletrólitos. Em ambientes confinados, a combinação desses gases com faíscas pode provocar combustões violentas [9].

2.3 Choques Elétricos e Falhas de Isolamento

Os packs de bateria veicular operam frequentemente acima de 400 V. Qualquer falha no isolamento ou contato indevido durante manutenção ou acidente pode causar descargas elétricas perigosas [12].

2.4 Falhas Mecânicas e Impactos

Durante colisões ou transporte inadequado, os módulos podem sofrer deformações estruturais que levam à perfuração de células e vazamentos, com risco de ignição [8].

3. Casos Reais de Acidentes com Baterias Veiculares no Brasil

3.1 Incêndio em bateria de concessionária — Itajaí (SC), agosto de 2025

Em agosto de 2025, por volta das 4h30 da manhã, o Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina foi acionado para atender a uma ocorrência de incêndio em uma concessionária automotiva no município de Itajaí (SC). O foco do incêndio foi uma bateria de veículo elétrico, previamente removida de um automóvel elétrico, que se encontrava acondicionada em um tanque metálico no pátio da empresa [20].

Ao chegarem ao local, as equipes de emergência constataram que o componente havia entrado em combustão espontânea. A operação de combate foi realizada com submersão completa da bateria em água (figura 01), utilizando uma linha de mangueira de alta vazão para preenchimento do tanque. Apesar da submersão, a liberação de calor e vapores tóxicos continuou por cerca de 30 minutos, indicando a presença de reação térmica autoalimentada típica de casos de thermal runaway, frequentemente observados em baterias de íons de lítio [22]

A intervenção foi encerrada sem vítimas, danos estruturais à concessionária ou propagação do fogo a outros veículos [21]. No entanto, a ocorrência chamou atenção para os riscos associados ao armazenamento e manuseio inadequado de sistemas de armazenamento eletroquímico de alta energia fora do ambiente veicular [20]

Figura 01: Bateria em submersão na água [20].

3.2 Tragédia na BR-060 — Volvo XC40 elétrico pega fogo e motorista falece (Goiás, março de 2025)

Em março de 2025, um Volvo XC40 Recharge totalmente elétrico pegou fogo após colidir com uma árvore na BR-060, entre Anápolis e Brasília (GO) (figura 02). O incêndio teve início na bateria de íons de lítio e se alastrou rapidamente, impossibilitando o resgate do condutor, que faleceu carbonizado. O combate às chamas durou cerca de três horas, destacando a dificuldade em conter eventos de

thermal runaway em baterias de alta tensão. A ocorrência levantou preocupações sobre falhas no sistema de gerenciamento térmico (BMS) e a necessidade de protocolos emergenciais mais robustos para veículos elétricos [19].

Figura 02: Veículo elétrico Volvo XC40- acidente entre Anápolis e Brasília [19].

3.3 Incêndios em veículos híbridos em SP e testes emergenciais (Região Metropolitana de São Paulo, fevereiro-março de 2025)

Em fevereiro de 2025, incêndios atingiram dois SUVs híbridos Volvo XC60 no interior paulista, um aconteceu em Assis durante condução exclusiva a gasolina (2.000 L de água usados), e outro em Presidente Prudente durante recarga residencial (8.000 L utilizados ao longo de 8 horas). Em testes controlados, o Corpo de Bombeiros concluiu que suprimir incêndios em veículos elétricos pode exigir até 3.500 L de água ou, com adição de espuma e manta antifogo, reduzir o volume para ~2.500 L [23].

3.4 Ônibus elétrico tombado em SP resiste a incêndio (Praça João Mendes, SP, dezembro de 2024)

Um acidente com um ônibus elétrico em São Paulo resultou em tombamento e combustão da carenagem plástica, porém as baterias de íon lítio ferro fosfato (LFP, $LIFePO_4$) permaneceram intactas e sem fuga térmica conforme apresentado na Figura 03. A intervenção durou cerca de 30 minutos, com monitoramento estável da temperatura das células. O incidente foi usado para demonstrar a robustez das baterias, mesmo sob forte impacto[25][26][27].

4. Atenção dos bombeiros aos edifícios com carros elétricos (São Paulo, setembro de 2024)

O Corpo de Bombeiros do Estado de São Paulo emitiu alerta quanto ao elevado risco de incêndios em estacionamentos residenciais e comerciais que possuem estações de recarga (eletropostos). Segundo a corporação, esses incidentes são de difícil contenção, em virtude da liberação de gases tóxicos e do alto risco de reignição das baterias de íon-lítio em combustão prolongada. Como resposta, estão em elaboração medidas normativas que preveem a obrigatoriedade de instalação de chuveiros automáticos (*sprinklers*), ventilação mecânica com exaustão forçada, equipamentos de deteção de fumaça e estrutura de isolamento entre vagas com pontos de recarga [25][26][27].

Figura 03: Ônibus que colidiu em poste na cidade de São Paulo. Fonte

4.1 Risco elevado de incêndio em prédios e estacionamentos

Em setembro de 2024, o Corpo de Bombeiros do Estado de São Paulo emitiu um alerta público sobre os riscos ampliados de incêndios em estacionamentos com veículos elétricos, destacando a dificuldade de extinção desses focos devido à liberação de vapores tóxicos e à possibilidade de reignição, mesmo após aparente controle térmico, conforme apresentado na Figura 04. A preocupação principal está relacionada ao fenômeno de thermal runaway, no qual a elevação descontrolada de temperatura interna gera reações exotérmicas em cadeia, dificultando a supressão do fogo com métodos tradicionais [2][1].

Figura 04: veículo elétrico pegando fogo e sendo abordado por bombeiros. (SP, 2024). [18]

Em resposta, iniciaram-se estudos para criar protocolos de segurança em edifícios com eletropostos, como instalação de chuveiros automáticos, ventilação mecânica robusta, barreiras corta-fogo e isolamento adequado nas vagas com veículos elétricos, com a inclusão desses elementos já consideradas nos projetos arquitetônicos e nas normas técnicas, como a ABNT NBR 9077 (Saídas de emergência) e a ABNT NBR 17240 (Sistemas de detecção e alarme de incêndio). A ausência de regulamentação específica tem sido apontada como um dos principais gargalos para a expansão segura da infraestrutura de recarga no país [18].

5. CONCLUSÃO

O presente estudo evidenciou que, embora os veículos elétricos representem um avanço relevante na transição energética e redução de emissões, os sistemas de armazenamento baseados em baterias de íons de lítio ainda apresentam riscos significativos à segurança operacional, tanto em ambientes públicos quanto privados. A análise dos acidentes ocorridos entre 2012 e 2025 demonstra que falhas térmicas, curtos-circuitos, deficiências em protocolos de segurança e ausência de infraestrutura adequada estão entre as principais causas de incêndios e explosões.

Casos emblemáticos como o incêndio em Itajaí (SC), a tragédia na BR-060 (GO), e os testes conduzidos pelo Corpo de Bombeiros de São Paulo demonstram a necessidade de atualização normativa, revisão dos procedimentos de emergência e capacitação contínua dos profissionais envolvidos na cadeia de manutenção, recarga e descarte desses sistemas. Além disso, a segurança de edifícios com eletropostos e a manipulação pós-colisão de veículos elétricos exigem novos paradigmas de projeto e resposta técnica.

Portanto, recomenda-se: a formulação de normas técnicas específicas para veículos eletrificados, o fortalecimento das diretrizes das NRs 10, 12 e 20 com foco em risco eletroquímico, a promoção de campanhas de treinamento voltadas a eletricistas automotivos, brigadistas, projetistas e gestores prediais e a eletromobilidade deve ser acompanhada por um ecossistema normativo e operacional robusto, capaz de mitigar os riscos inerentes ao uso de tecnologias energéticas emergentes.

6. AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao professor Marçal Rodrigues Pires, pelo suporte técnico e orientação crítica ao longo do desenvolvimento deste trabalho, cuja experiência foi essencial para a consolidação desta pesquisa. A CAPES pela concessão de bolsa de mestrado. A FINEP pelo financiamento do Projeto. Um agradecimento especial à minha esposa, Cristifani Morais Lucas, por seu apoio incondicional, incentivo diário e compreensão durante todas as etapas deste projeto.

7. REFERÊNCIAS

[1] LIU, K. et al. Lithium-ion battery fire hazards and safety strategies. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 135, 2021. Disjoined em: https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110084. Acesso em: 23 ago. 2025.

[2] WANG, Q. et al. Thermal runaway caused fire and explosion of lithium-ion battery. Journal of Power Sources, v. 208, p. 210–224, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.02.038. Acesso em: 27 ago. 2025.

[3] FERREIRA, L. M. et al. Avaliação da infraestrutura elétrica para recarga de veículos elétricos no Brasil. Caderno de Energia, v. 18, n. 2, p. 41–58, 2023. Disponível em: https://www.cadernodeenergia.org.br/index.php/ce/article/view/912. Acesso em: 27 ago. 2025.

[4] QUATRO RODAS. Após incêndios e simulações, Brasil terá norma para carregadores de carros elétricos. Quatro Rodas, 8 jun. 2025. Disponível em: https://quatrorodas.abril.com.br/carros-eletricos/apos-incendios-e-simulacoes-brasil-tera-norma-para-carregadores-de-carros-eletricos/. Acesso em: 27 ago. 2025.

[5] LIMA, D. S. et al. Análise de riscos associados ao uso de baterias de íons de lítio em veículos elétricos no Brasil. Revista Engenharia e Segurança do Trabalho, v. 21, n. 1, p. 57–68, 2023. Disponível em: https://revistas.ufpr.br/engseg/article/view/90235. Acesso em: 27 ago. 2025.

[6] BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. NR 10 – Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade. Brasília, 2019a. Disponível em: https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/assuntos/inspecao/seguranca-e-saude-no-trabalho/normas-regulamentadoras/nr-10. Acesso em: 27 ago. 2025.

[7] BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. NR 12 – Segurança no Trabalho em Máquinas e Equipamentos. Brasília, 2019b. Disponível em: https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/assuntos/inspecao/seguranca-e-saude-no-trabalho/normas-regulamentadoras/nr-12. Acesso em: 27 ago. 2025.

[8] GAO, Y. et al. Safety issues and mechanisms of lithium-ion battery cell upon mechanical abusive loading: A review. Energy Storage Materials, v. 24, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ensm.2019.07.017. Acesso em: 23 ago. 2025.

[9] ZHANG, G. et al. Revealing the impact of slight electrical abuse on the thermal safety of lithium-ion batteries. ACS Applied Energy Materials, v. 4, n. 2, p. 1744–1752, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1021/acsaem.0c02442.

[10] DAI, Y. Thermal runaway process in lithium-ion batteries: A review. Journal of Energy Storage, v. 72, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108205. Acesso em: 23 ago. 2025.

[11] DAI, Y. Thermal runaway process in lithium-ion batteries: A review. Journal of Energy Storage, v. 68, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.est.2025.108123. Acesso em: 23 ago. 2025.

[12] LIU, K. et al. Lithium-ion battery fire hazards and safety strategies. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 135, p. 110084, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110084.

[13] OU, X. et al. A comprehensive review of thermal management strategies for lithium-ion batteries. Journal of Power Sources, v. 604, p. 230019, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2023.230019.

[14] PREFEITURA DE PRESIDENTE PRUDENTE. Veículo híbrido da Volvo pega fogo em garagem residencial. 2025. Disponível em: https://www.presidenteprudente.sp.gov.br/noticia/volvo-hibrido-pega-fogo. Acesso em: 23 ago. 2025.

[15] RIBEIRO, C. Homem morre carbonizado após carro elétrico pegar fogo na BR-060, em Goiás. G1 Goiás, 2025. Disponível em: https://g1.globo.com/go/goias/noticia/2025/03/22/carro-eletrico-pega-fogo-na-br-060.ghtml. Acesso em: 23 ago. 2025.

[16] TV RECORD. Ônibus elétrico tomba no centro de SP e incêndio é contido. Jornal da Record, 2024. Disponível em: https://recordtv.r7.com/jornal-da-record/videos/onibus-eletrico-tomba-no-centro-de-sp-17122024. Acesso em: 23 ago. 2025.

[17] FOLHA DE SÃO PAULO. Bombeiros alertam para risco de incêndios com carros elétricos em edifícios. Folha, 2024. Disponível em: https://www1.folha.uol.com.br/cotidiano/2024/09/bombeiros-alertam-sobre-carros-eletricos-em-predios.shtml. Acesso em: 23 ago. 2025.

[18] NAPOLI, Eric. Bombeiros veem risco de incêndio com carros elétricos em prédios. Poder360, Brasília, 2 set. 2024. Disponível em: https://www.poder360.com.br/poder-infra/bombeiros-veem-risco-de-incendio-com-carros-eletricos-em-predios/ . Acesso em: 31 ago. 2025.

[19] O BAHIA POST. Volvo XC40 elétrico pega fogo na BR-060 e médico falece carbonizado. O Bahia Post, 24 mar. 2025. Disponível em: https://www.obahiapost.com/noticia/volvo-xc40-el%C3%A9trico-pega-fogo-na-br-060-e-m%C3%A9dico-falece-carbonizado . Acesso em: 27 ago. 2025.

[20] WOLFF, Vitor – Incêndio atinge bateria de carro elétrico em Itajaí,- SCTODIA, agosto de 2025 – Disponível em: https://sctd.com.br/seguranca/incendio-atinge-bateria-de-carro-eletrico-em-itajai/. Acesso em 31 de agosto de 2025.

[21] VISOR NOTICIAS – bateria de carro elétrico pega fogo em concessionaria e mobiliza bombeiros em Itajai – Visor, agosto de 2025 – Disponível em: https://visornoticias.com.br/bateria-de-carro-eletrico-pega-fogo-em-concessionaria-e-mobiliza-bombeiros-em-itajai/. Acesso em 31 de agosto de 2025

[22] SHAHID, S.; AGELIN-CHAAB, M. A review of thermal runaway prevention and mitigation strategies for lithium-ion batteries. Energy Conversion and Management – dezembro de 2022. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590174522001337 . Acesso em: 27 agosto 2025.

[23] AutoPapo. Volvo XC60 pega fogo enquanto recarregava no interior de SP. AutoPapo, 28 fev. 2025. Disponível em: https://autopapo.com.br/curta/volvo-xc60-pega-fogo-recarga/. Acesso em: 25 agosto 2025.

[24] DIÁRIO DO TRANSPORTE. Fotos exclusivas: Polícia Civil, Bombeiros e fabricante investigam se atrito entre poste semafórico e bateria provocou incêndio em ônibus elétrico que tombou no centro de São Paulo. Disponível em: https://diariodotransporte.com.br/2024/12/13/fotos-exclusivas-policia-civil-bombeiros-e-fabricante-investigam-se-atrito-entre-poste-semaforico-e-bateria-provocou-incendio-em-onibus-eletrico-que-tombou-no-centro-de-sao-paulo-veiculo-foi-seguro/. Acesso em: 25 agosto 2025.

[25] BVE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO VEÍCULO ELÉTRICO; CNCGBM – CONSELHO NACIONAL DE COMANDANTES-GERAIS DOS CORPOS DE BOMBEIROS MILITARES. Diretrizes para ocupações com estações de recarga em edificações. Disponível em: https://canalve.com.br/bombeiros-regras-estacoes-recarga-predios/. Acesso em: 25 agosto 2025.

[26] GUIA DO INVESTIDOR. Donos de carros elétricos em SP terão que instalar chuveiro e exaustor na garagem. *Guia do Investidor*, 03 jul. 2025. Disponível em: https://guiadoinvestidor.com.br/noticias/donos-de-carros-eletricos-em-sp-terao-que-instalar-chuveiro-e-exaustor-na-garagem/. Acesso em: 26 agosto 2025.

[27] QUATRO RODAS. Após incêndios e simulações, Brasil terá norma para carregadores de carros elétricos. *Quatro Rodas*, 08 jun. 2025. Disponível em: https://quatrorodas.abril.com.br/carros-eletricos/apos-incendios-e-simulacoes-brasil-tera-norma-para-carregadores-de-carros-eletricos/. Acesso em: 28 agosto 2025.

44º SENAFOR

28th International Forging Conference
13th International Sheet Metal Forming Conference / 10th BrDDRG Congress
13th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies – Brazil/RS
2nd International Conference on Innovation in Materials and Manufacturing
Hotel Plaza São Rafael – P. Alegre RS, October 1-3, 2025

CABANA SUSTENTÁVEL UMA ALTERNATIVA VIÁVEL E ECOLÓGICA PARA SOBREVIVÊNCIA ECONÔMICA

Eduardo Duarte Cabral - Autor [1]
Henrique Gabriel Cabral - Autor [2]
Jorge Pimentel de Morais - Autor [3]
Lucas Melo Machado - Autor [4]
Marçal Rodrigues Pires - Orientador [5]
Vicente Mariano Canalli - Orientador [6]

RESUMO

A cabana sustentável individual, cujo Projeto Assistido por Computador ou CAD – *Computer Aided Design* é apresentado neste artigo, pretende ser um piloto didático. Novas ideias poderão ser incrementadas na medida do possível, com pequenos recursos financeiros. O emprego de materiais descartados de alta qualidade, imprimem uma maior durabilidade a cabana proposta. A referida reutilização introduz o respeito ao meio ambiente, permitindo com base na criatividade, fugir do reprocessamento de materiais e do consequente incremento da poluição. Destaca-se também segundo as suas dimensões, a redução de mão de obra, a possibilidade de um transporte fácil e o atrelamento de sua estrutura a uma fundação por meio de parafusos. A cabana no momento, foi equipada com um painel solar e iluminação econômica LED – *Light Emmiter Diode 12V*, permitindo de forma muito simples, incrementar a eficiência e segurança dispensando o inversor *off grid*.

Palavras Chave — Cabana, Sustentável, Sobrevivência, Econômica, Ecológica

[1] Electrical Engineering Student; Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul, Brazil
[2] Electrical Engineering Master; Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul, Brazil
[3] Mechanical Engineer, CNPq Energy and Gas Application Group, Brazil
[4] Electrical Engineer, Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul, Brazil
[5] Prof. Dr. Eng. Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul, Brazil.
[6] Prof. Dr. Eng. SSRC-VC – Space for Science, Research and Culture V. Canali, Brazil.

O projeto descrito visa permitir a aplicabilidade de fontes e técnicas peculiares a utilização de energias renováveis. Além de sua utilização em locais arborizados, a cabana pode servir como um recurso didático. para benefício de eventuais interessados em fomentar temas de pesquisa. A estrutura simples e transportável, ou até mesmo ampliada, pode ser uma alternativa para auxílio, na ocorrência de catástrofes. Neste caso, o projeto CAD permitiu flexibilizar o reaproveitamento ordenado de materiais reaproveitáveis existentes. Com um baixo custo, a cabana proposta pode ser útil e especialmente segura, devido a utilização de uma fonte de tensão reduzida, que na versão apresentada, atende uma necessidade básica como a iluminação.

SUSTAINABLE CABIN A VIABLE AND ECOLOGICAL ALTERNATIVE FOR ECONOMIC SURVIVAL

Eduardo Duarte Cabral - Author [1]
Henrique Gabriel Cabral - Autor [2]
Jorge Pimentel de Morais - Author [3]
Lucas Melo Machado - Author [4]
Marçal Rodrigues Pires - Adviser [5]
Vicente Mariano Canalli - Adviser [6]

ABSTRACT

The individual sustainable cabin, whose Computer-Aided Design (CAD) is presented in this article, is intended as a teaching pilot. New ideas can be expanded as much as possible with limited financial resources. The use of high-quality discarded materials gives the proposed cabin greater durability. This reuse introduces environmental respect, allowing for creativity, avoiding the reprocessing of materials and the consequent increase in pollution. Its dimensions also stand out for reducing labor, allowing for easy transportation, and for attaching its structure to a foundation using bolts. The cabin is currently equipped with a solar panel and energy-saving 12V LED (Light Emitter Diode) lighting, allowing for simple efficiency and safety improvements without the need for an off-grid inverter. The project described aims to apply sources and techniques specific to the use of renewable energy. In addition to its use in wooded areas, the cabin can serve as a teaching resource for those interested in fostering research topics. The simple, transportable structure, or even expanded, can be an alternative for disaster relief. In this case, the CAD design allowed for the flexible, orderly reuse of existing recyclable materials. At a low cost, the proposed cabin can be useful and especially safe, due to its use of a reduced-voltage source, which, in the presented version, meets a basic need such as lighting.

1. INTRODUÇÃO

O cenário atual faz com que as pessoas com menores recursos passem a se preocupar com uma forma de vida simples, em que seja possível diminuir as despesas diárias e os altos custos dos empreendimentos. Entraves enfrentados no dia a dia, levam desde há

muito tempo, a pensar no conceito de família atômica. Uma família pequena, ou até mesmo a opção de morar sozinho, diminui a necessidade do espaço físico vital, que representa um dos maiores custos na vida moderna. A vida nas grandes cidades tolhe a liberdade e sossego dos indivíduos. Por outro lado a vida em lugares remotos, onde o metro quadrado é mais acessível, retira o indivíduo de uma situação cômoda, tornando-o agente de sobrevivência. Em tais ambientes as árvores responsáveis pelo ar que se respira, podem representar uma barreira térmica natural e econômica aos ambientes. Esforços tem se dirigido a Educação Financeira, pois os milagres seguem difíceis, sendo necessário equilibrar receitas e despesas. As receitas já em muitos casos não comportam uma vida digna e nem mínimas condições para que pessoas humildes e trabalhadoras possam arcar com encargos mensais, sem considerar a inda o fardo que representa o custo de moradia.

2. CABANAS OU MINI CHALÉS SIMPLES DISPONÍVEIS COMERCIALMENTE

Versões de mini chalés são indicados comercialmente para investidores no turismo. Também afirmam ser essa a escolha perfeita com alto retorno do investimento para pessoas que têm um terreno vazio em um lugar turístico tanto em zona rural ou área de praia,. As menores versões disponíveis, na mesma ótica da implementação proposta neste trabalho, são as de 5,0 m^2. Cabanas deste tipo, também denominadas de mini chalés, são disponibilizadas comercialmente em [1] como visto na figura 1, com uma largura de 2,0m, um comprimento de 2,5m e uma altura de 1,5m.

(a) vista e preço (b) planta baixa

Figura 1: Mini chalé de 5m^2

3. REUSO DE METAIS NA ESTRUTURA FONTAL E TRASEIRA

Visando economia, robustez e durabilidade é enfatizado neste trabalho, o reuso de metais galvanizados na estrutura básica. Paredes e telhado utilizam aluzinco.

3.1. Estrutura com reuso de tubos galvanizados quadrados e retangulares

Um tubo retangular ou quadrado galvanizado visto na figura 2(a), segundo as normas da ABNT [2], é um tubo de aço com seção transversal retangular, revestido com uma camada de zinco para proteção contra corrosão, e fabricado de acordo com a norma NBR 6591. Essa norma estabelece os requisitos para tubos de aço carbono com costura, utilizados em estruturas soldadas, parafusadas e rebitadas.

3.2. Paredes usando chapa que envolve a bobina de matéria prima de telhas *aluzinco*

A composição do aluzinco, segundo a ABNT [3]-[4], refere-se principalmente às normas técnicas que estabelecem os requisitos para a fabricação e utilização de aço revestido com liga de alumínio-zinco. A norma ABNT NBR 14513/2002, por exemplo, trata das telhas de aço revestido de seção transversal ondulada e trapezoidal, enquanto a ABNT NBR 14514 estabelece critérios para a aplicação desse material. O aluzinco, também conhecido como Galvalume, é uma liga metálica composta por aproximadamente 55% de alumínio, 43,5% de zinco e 1,5% de silício. Essa composição confere ao material alta resistência à corrosão, tornando-o ideal para aplicações em ambientes externos e sujeitos a intempéries. Este é o mesmo material usado na capa de bobina da mesma matéria prima vista na figura 2(b).

(a) tubos galvanizados

(b) capa de bobina

Figura 2: Reuso de metais galvanizados

4. VERSÕES BÁSICAS PARA COBERTURA

Por se tratar de uma cabana o telhado já oferece fechamento nas laterais. A estrutura prevê a utilização de madeira tratada e de materiais resistentes a corrosão

4.1. Laterais e beirais com tábuas tratadas de pinus *Elliottii*

Segundo, [5] a madeira de *Pinus Elliottii* natural tem sua origem na América do Norte, mais especificamente nos Estados Unidos. Foi trazida para o Brasil na década de 70, onde hoje é cultivada nas regiões sudeste e sul. Com o aumento da procura por madeira de Pinus e a pressão sobre o corte de florestas nativas, o Pinus Natural se tornou uma opção bastante atraente para o mercado, por causa do seu custo-benefício. A popularidade da madeira se dá devido aos seu atributos. O Pinus tem uma das melhores condições técnicas e econômicas para a fabricação e o desenvolvimento de produtos com alto valor agregado.
O tratamento das tábuas de *Pinus Elliottii*, vistas na figura 3, visa melhorar sua durabilidade e resistência a agentes biológicos, como fungos e insetos, além de aumentar sua estabilidade estrutural.

(a) perspectiva frontal

(b) perspectiva traseira

Figura 3: Tábuas de pinus nas laterais

4.2 Cobertura econômica condicionada à proteção vegetal

As telhas de zinco para telhado devem atender a normas técnicas da ABNT para garantir qualidade e segurança. A norma NBR 14513/2002 estabelece regras para laminação de telhas de aço revestidas, incluindo as de zinco, de seção transversal ondulada As telhas de zinco comuns, também conhecidas como telhas galvanizadas, apresentam diversas vantagens, incluindo durabilidade, resistência a intempéries, baixo custo e facilidade de instalação. Estas telhas são feitas de aço revestido com zinco, o que as protege contra corrosão e aumenta sua vida útil. Telhados com pouca inclinação podem acumular água, folhas, galhos e outros detritos, o que pode obstruir o escoamento da água e danificar as telhas. A inclinação utilizada em telhas de zinco comum usadas é crucial para a durabilidade e bom desempenho do telhado, pois facilita o escoamento da água da chuva, prevenindo acúmulo e problemas como corrosão, infiltração e deformação. Uma inclinação adequada também contribui para a estabilidade da estrutura, evitando o empenamento das telhas.

4.3 Cobertura com isolamento térmico e acústico

Telhas de zinco podem ser combinadas com camadas de isolante (EPS ou poliuretano) , como ilustra a figura 4(a), permitindo melhorar o isolamento térmico e acústico.

(a) isolamento termo-acústico nas telhas [6]

(b) ampliação e aeração [7]

Figura 4: Detalhes da cobertura

4.4. Incremento de espaço e ventilação

A possibilidade de abertura e apoio do telhado, vista na figura 4(b), é uma alternativa que contribui para melhoria da ventilação, ampliando o espaço coberto disponibilizado

5. OPÇÕES SIMPLES PARA ILUMINAÇÃO NATURAL

Opções para iluminação natural, que permitem a economia de energia são descritas a seguir:

5.1. Iluminação natural com vidro e moldura descartadas

Optou-se por iluminação natural na traseira da cabana, figura 5(a) utilizando para tal uma moldura de madeira com vidro descartada, como ilustra a figura 5(b).

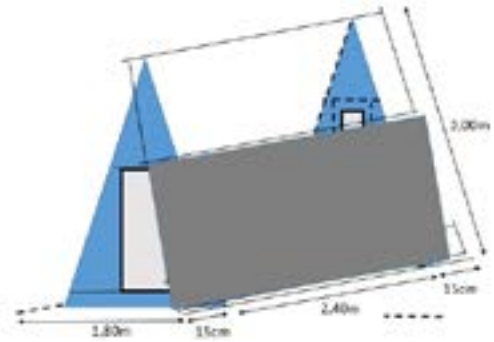
(a) moldura de vidro descartada

(b)iluminação via parede traseira

Figura 5: Iluminação natural com vidro e moldura descartados

5.2 Iluminação natural via telhas translucidas

A utilização de telhas translucidas, como as da figura 6(a), é uma opção para economia de energia elétrica destinada a iluminação. Por razões de economia, estas telhas podem ser utilizadas apenas na parte mais alta da cabana, como ilustra a figura 6(b).



(a) vista com ondas distintas [8] (b) aplicação no telhado

Figura 6: Telhas translúcidas na iluminação natural

6. ALTERNATIVAS PARA ILUMINAÇÂO ARTIFICIAL SEM INVERSOR

A iluminação artificial é importante, quando a luz natural não é disponibilizada. A utilização de corrente continua e baixas tensões, dispensa o uso de um inversor, que normalmente é empregado para obter corrente alternada a uma tensão elevada. Dispensando-se este estágio de conversão que introduz perdas, se obtém um incremento da eficiência do sistema

6.1. Iluminação artificial fraca com associação de LEDs

Uma das opções limitada, mas eficiente, é uma iluminação artificial pouco intensa obtida a partir de uma associação de LEDs – *Light Emitter Diodes*, com o emprego de uma placa de circuito impresso, como a ilustrada na figura 7(a). Mediante associação, os LEDs podem ser adaptados a qualquer tipo de bateria que esteja disponível, inclusive de tensões muito baixas da ordem de 3,0V, incrementando em muito a segurança. Utilizados sem limitador de corrente são altamente eficientes, consomem muito pouca corrente, proporcionando uma redução na seção dos condutores da instalação e também o uso de painéis solares de menor potência e custo.

6.2. Iluminação artificial com lâmpadas LED comerciais de 12V

Lâmpadas LED comerciais de 12V do tipo visto nas figura 7(b) e 7(c) também são uma opção para a iluminação de maior potência, também sem a necessidade de um inversor.

(a)associação artesanal 12V (b)lâmpada comercial 12V 7W

Figura 7: Iluminação artificial com LEDs

7. VERSÕES SIMPLES PARA COLETA DE ÁGUA

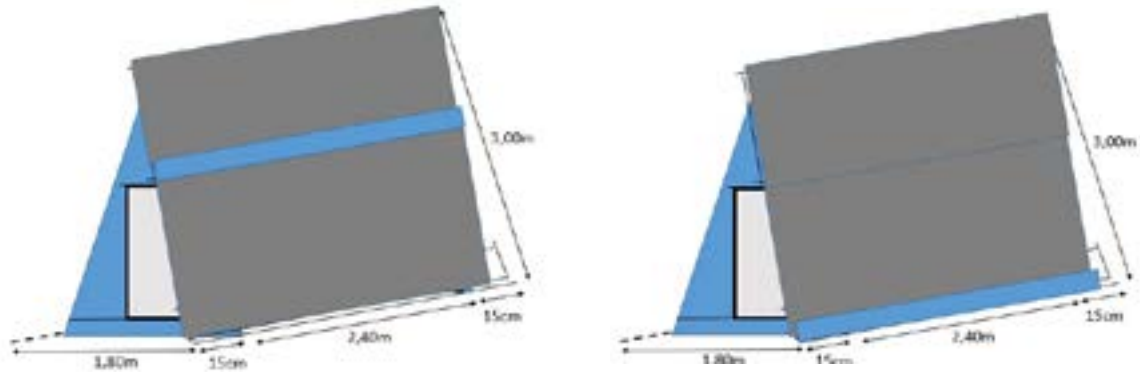
Uma das opções interessantes para o projeto é a coleta de água da chuva. Versões mais aprimoradas poderão incrementar o volume da água captada bem como prever seu tratamento químico e elétrico. Versões simples de coleta utilizando o telhado associado a calhas são descritas a seguir:

7.1. Utilização de calha intermediária e uso da gravidade

A utilização de uma calha intermediária no telhado, permite que água da chuva, esteja disponível por gravidade mediante a utilização de um depósito elevado do chão, como mostra a figura 8(a).

7.2. Utilização de calha no limite inferior e bomba elétrica

Com a calha na parte inferior, como na figura 8(b), embora o volume de água que possa ser captado aumente com a maior área do telhado, exige a utilização uma bomba de água e de energia elétrica, diminuindo eficiência e incrementado o custo do projeto.



(a)calha superior (b) calha inferior

Figura 8: Coleta de água

8. VERSÕES BÁSICAS PARA ALIMENTAÇÃO COM ENERGIA SOLAR

A escolha dos painéis dependerá do consumo de energia instalada na cabana. As opções implementadas poderão ser testadas no futuro. O projeto permite a aplicação e teste de diferentes especificações de potência de painéis solares disponíveis no ECPC-VC – Espaço de Ciência Pesquisa e Cultura – Vicente Canali

8.1. Painéis solares disponíveis no ECPC-VC

A potência nominal de um painel solar é aquela obtida sob as condições de teste padrão (STC – *Standard Test Conditions*), Esse valor etiquetado na placa depende do tamanho do painel fotovoltaico e do número de células fotovoltaicas no seu interior.

As condições de teste padrão de acordo com [9] são:

a) **Irradiação Solar**: A intensidade da luz solar incidente sobre o painel solar durante o teste, é padronizada em 1000 watts por metro quadrado (W/m²). Isso representa a irradiação solar média que atinge a superfície da Terra em um dia claro ao nível do mar.

b) **Massa de Ar**: A massa de ar é especificada como AM 1.5, o que representa a média da atmosfera padrão ao nível do mar. Isso é importante porque a intensidade da luz solar, pode variar dependendo da localização geográfica e das condições atmosféricas.

c) **Temperatura da Célula**: A temperatura da célula solar durante o teste, é definida em 25°C (77°F). Esta temperatura é usada como referência para avaliar o desempenho do painel sob condições típicas de operação.

O quadro 1 resume especificações como ponto de máxima potência PMP - *Power Maximum Point* –, dimensões em mm, Tensão de circuito aberto Voc – *Open Circuit Voltage*, Icc – Corrente de curto circuito, V(PMP) – tensão e corrente I(PMP) no ponto de máxima potência.

PMP	5W	20W	40W	120W	250W
dim(mm)	338x215x17	520x295x25	550x635x30	680x1500x30	1640x990x40
Voc	21,5V	21,5V	21,8V	21,52V	36,3V
Icc	0,33A	1,35A	2,54A	7,35A	8,71A
V(PMP)	17V	17,2V	17,6V	17,56V	30,6V
I(PMP)	0,3 A	1,17A	2,28 A	6,75 A	8,17 A

Quadro 1: Especificações dos painéis disponíveis no ECPC-VC

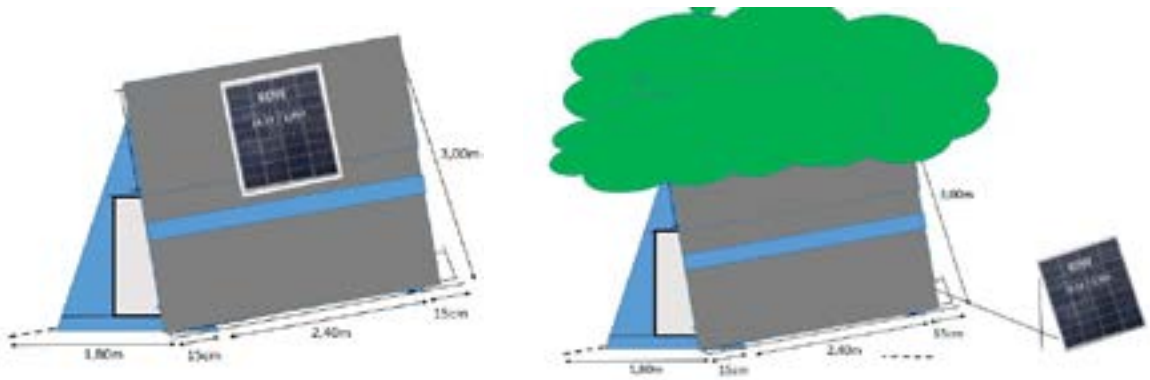
Consideradas as dimensões, da cabana projetada, a instalação do painel poderá ser no telhado ou remota como descrito na sequência.

8.2. Painel associado ao telhado

A instalação do painel junto ao telhado como na figura 9(a), seria recomendada quando associada a utilização de telhas termo acústicas, fator que encareceria o projeto. Isto permitiria com a devida inclinação e orientação, que a irradiação solar atingisse os painéis, com a devida isolação térmica da cabana.

8.3. Painel remoto

Na versão mais econômica, com a utilização de telhas de zinco comum recicladas, a cabana teria que ser instalada na sombra. Neste caso seria necessária uma instalação remota do painel, como ilustrado na figura 9(b).



(a)no telhado com isolamento térmico (b)remota sem isolamento térmico

Figura 9: Posicionamento do painel solar

9. ARMAZENAMENTO DE ENERGIA E CONTROLE DE GERAÇÃO

A utilização de energia solar *off grid*, proposta neste artigo, além dos painéis, necessita de um armazenamento de energia.

9.1. Armazenamento de energia elétrica

A tensão nominal de uma célula de bateria de íon de lítio (Li-ion) é geralmente de 3,7V, mas pode variar entre 2,5V e 4,2V durante o uso, dependendo do estado de carga e do fabricante. O armazenamento de energia irá depender do tipo de carga instalada. Versões mais econômicas podem utilizar baterias Li-ion associadas em soquetes devidamente adaptados para sua função e tensão como os disponíveis no ECPC-VC vistos na figura 10(a). Outra possibilidade econômica é utilizar blocos disponíveis em computadores portáteis descartados ou novos como o visto na figura 10(b), que incluem baterias e um BMS – *Battery Mangement System,* responsável por gerenciar o processo de carga..

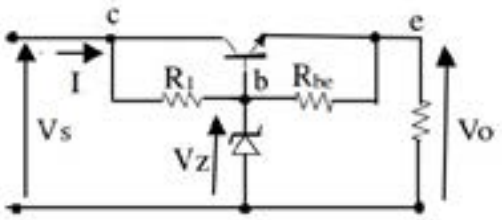
(a) soquetes adaptados a células Li-ion

(b) bateria de *notebook* com BMS

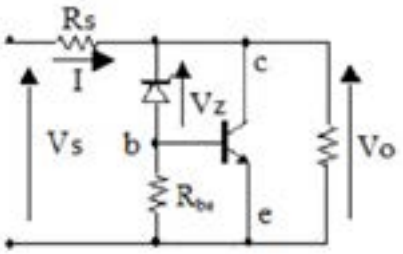
Figura 10: Armazenamento de energia com baterias Li-ion

9.2. Dispositivos simples para o controle de geração

Outros dispositivos artesanais simples que poderão ser utilizados, derivam dos circuitos vistos na figura 11(a) e 11(b). São reguladores de tensão lineares que em versões integradas podem ser ajustáveis por meio de um *trimpot* de precisão. Células fotoelétricas contendo um foto-resistor acondicionado como visto na figura 11(c), permitem impedir que dispositivos de iluminação consumam energia, enquanto a iluminação artificial estiver disponível.



(a) regulador série [10]



(b) regulador paralelo [10]

(c) foto-resistor

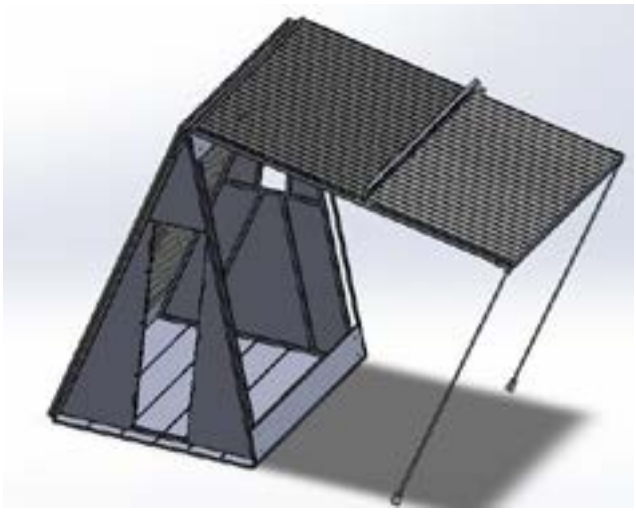
Figura 11: Dispositivos de controle de geração

10. PROJETO ASSISTIDO POR COMPUTADOR DA ESTRUTURA DA CABANA

No projeto assistido por computador, considerou-se as seguintes características:

a) Estrutura com reuso de tubos galvanizados
b) Paredes usando chapa que envolve a bobina de matéria prima de telhas *aluzinco*
c) Beirais com utilização de tábuas de pinus de polegada com 2,70m nas laterais
d) Cobertura econômica condicionada a proteção vegetal
e). Geração remota com base para o painel
f). Coleta de água com calha intermediária e uso da gravidade
g) Iluminação natural via telhas translucidas
h) Iluminação natural com vidro e moldura descartadas
i). Iluminação artificial com lâmpadas LED de 12V

Na figura 12 é apresentado o projeto CAD da cabana proposta



(a) projeto CAD

(b) detalhes da calha

Figura 12: Projeto assistido por computador da cabana

11. IMPLEMENTAÇÃO FÍSICA DA CABANA

Por questões econômicas e a título de ilustração, a versão da cabana implementada foi um pouco distinta da apresentada no projeto assistido por computador, envolvendo os seguintes itens:.

a) Estrutura com reuso de tubos galvanizados
b) Paredes usando chapa que envolve a bobina de matéria prima de telhas *aluzinco*
c) Beirais com utilização de tábuas de pinus de polegada com 2,70m nas laterais
d) Cobertura de zinco sem isolamento térmico
e) Suporte para painel com geração remota
f) Coleta de água com calha inferior e bomba elétrica
g).Iluminação natural com vidro e moldura descartadas
h) Iluminação artificial fraca com associação de LEDs

A figura 13 ilustra a cabana implementada

(a)cabana

(b) suporte painel remoto

(c) bomba e depósito

Figura 13: Implementação física da cabana

12. FACILIDADE DE TRANSPORTE

A figura 14 mostra a facilidade de transporte da cabana implementada.

(a) vista lateral

(b) perspectiva traseira

(c) perspectiva dianteira

Figura 14: Facilidade de transporte

CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentado o projeto de construção de uma pequena cabana sustentável como uma alternativa didática para estudos multidisciplinares. A cabana implementada pode ser uma forma econômica e viável para auxiliar a sobrevivência em catástrofes. Sua utilização também pode ser prevista em lazer como em acampamentos. A versão implementada é simples e utiliza materiais descartados de qualidade. A estrutura e paredes são robustas e resistentes à corrosão. O trabalho partiu de dimensões aproximadas de alternativa comercial em madeira, porém prevendo um maior pé direito e facilidade de transporte. A disponibilização de energia solar e captação de água da chuva foram apresentadas em uma versão simples. Alternativas mais e menos eficientes foram descritas para iluminação. O emprego tanto de uma associação de LEDs – *Light Emitter Diodes,* como de uma lâmpada de 12V similar as utilizadas em residências da mesma tecnologia é ilustrado. As alternativas de iluminação visam simplicidade, eficiência e segurança dispensando a utilização de um inversor. Foi apresentada uma composição de alternativas para cobertura, coleta de água e iluminação natural e artificial. Algumas opções foram ilustradas de forma

econômica a nível um projeto assistido por computador ou CAD – *Computer Aided Design.* Finalmente a cabana foi implementada fisicamente no ECPC-VC e buscou ilustrar algumas alternativas distintas do projeto. A cabana implementada resultou fácil de ser transportada, favorecendo uma finalidade didática no ECPC-VC ou em campo, servindo como base para estudos, melhoria dos sistemas e também para aplicação futura de outras tecnologias e realização de testes com os painéis solares disponíveis.

AGRADECIMENTO

O grupo agradece o apoio dos organizadores do RENOMAT e em especial ao Prof. Lírio Schaeffer, pelo incentivo às iniciativas.

Referências

[1] (2024) SITE: MNHA CASA PRÉ-FABRICADA - https://minhacasaprefabricada.com.br/produto-tag/mini-chale/

[2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6591: Tubos de aço carbono com costura - Requisitos. Rio de Janeiro, 2008.

[3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14514: Telhas de aço revestidas de seção transversal ondulada - Requisitos. ABNT, 2002.

[4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14514: Telhas de aço revestidas de seção transversal ondulada e trapezoidal - Requisitos. ABNT, 2002

[5] (2025) SITE: SANTOS MADEIRAS - https://santosmadeiras.com.br/produtos/tabua-de-pinus-natural-com-no-2-x-29-x-300-cm/?srsltid=AfmBOoogfxMUrERPS-bpEgYjpeLlnOQW6MesH3k9Mm610BwsuH2VpWn

[6] (2025) SITE: THERMO VALLE - https://www.thermovalletelhas.com.br/telha-zinco-forro-isopor

[7] (2025) SITE: P-INTEREST - Modelos de chalé: 12 projetos com plantas grátis para baixar https://br.pinterest.com/pin/668151294711276151

[8] (2025) SITE: DISTRIBUIDORA REALIZE - https://www.distribuidorarealize.com.br/product-page/telha -1-00-x-1-10-onda-baixa-transl%C3%BAcida-polipropileno-leitosa-por-metro-linear

[9] (2025) SITE: BIOENERGIA - https://boaenergia.com.br/glossario/condicoes-de-teste-padrao-stc/

[10] CANALLI V.M., Apostila reguladores de tensão lineares, ECPC-VC, 2025

44º SENAFOR

28ª Conferência Internacional de Forjamento - Brasil
14ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas / 11º Congresso do BrDDRG
14ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis
3ª Conferência Internacional de Inovação em Materiais e Manufatura
Porto Alegre, RS, dias 1, 2 e 3 de outubro de 2025
www.senafor.com

OTIMIZAÇÃO DA CAPACIDADE DE CÉLULAS LIFEPO$_4$ EM BAIXAS TEMPERATURAS COM USO DE CONTROLADOR PI E CIRCUITO DE POTÊNCIA COM MODULAÇÃO PWM PARA AQUECIMENTO

Lucas Melo Machado [1]
Marçal Rodrigues Pires - Orientador [2]
Vicente Mariano Canalli - Orientador [3]

RESUMO

O desempenho das baterias de íons de lítio, especialmente as do tipo LiFePO4, costuma cair bastante em ambientes frios. Por isso, é fundamental propor maneiras eficientes de aquecê-las de forma a otimizar sua capacidade. Neste artigo, é apresentada uma solução que utiliza a Modulação por Largura de Pulso (Pulse Width Modulation - PWM) para controlar a corrente em aquecedores resistivos instalados junto às células da bateria. O principal objetivo é ajudar a manter a capacidade original das células LiFePO4, mesmo operando em temperaturas baixas, como -20°C. Para isso, foi desenvolvido um sistema de controle Proporcional-Integral (PI), que usa sensores para monitorar a temperatura, permitindo ajustar automaticamente o ciclo de trabalho ou duty cycle do modulador PWM, de forma a garantir um aquecimento preciso e seguro a partir de uma conversão eficiente. A expectativa é que os resultados mostrem que essa estratégia não só aquece as células até a faixa de operação de aproximadamente 25°C, mas também evita a perda de capacidade causada pela baixa temperatura. Em conclusão, a técnica proposta, que combina modulação PWM e controle PI para aquecer as células LiFePO4 em baixas temperaturas, se mostra uma alternativa viável e promissora para melhorar o desempenho e aumentar a vida útil das baterias LiFePO4 em ambientes frios.

Palavras chaves — LiFePO$_4$, Baixas Temperaturas, Aquecimento resistivo, PWM, Controle PI.

(1) Master Student, Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul, Brazil
(2) Prof. Dr. Eng. Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul, Brazil.
(3) Prof. Dr. Eng. SSRC-VC – Space for Science, Research and Culture V. Canali, Brazil.

OPTIMIZATION OF THE CAPACITY OF $LiFePO_4$ CELLS AT LOW TEMPERATURES USING A PI CONTROLLER AND POWER CIRCUIT WITH PWM MODULATION FOR HEATING

ABSTRACT

The performance of lithium-ion batteries, especially the $LiFePO_4$ type, tends to drop significantly in cold environments. Therefore, it is crucial to propose efficient ways to heat them to optimize their capacity. This article presents a solution that uses Pulse Width Modulation (PWM) to control the current in resistive heaters installed next to the battery cells. The main objective is to help maintain the original capacity of the $LiFePO_4$ cells, even when operating at low temperatures, such as -20°C. For this purpose, a Proportional-Integral (PI) control system was developed, which uses sensors to monitor the temperature, allowing for the automatic adjustment of the PWM modulator's duty cycle to ensure precise and safe heating from an efficient conversion. The results are expected to show that this strategy not only heats the cells to the operating range of approximately 25°C but also prevents the capacity loss caused by low temperatures. In conclusion, the proposed technique, which combines PWM modulation and PI control to heat $LiFePO_4$ cells at low temperatures, proves to be a viable and promising alternative for improving the performance and extending the lifespan of $LiFePO_4$ batteries in cold environments.

Keywords: $LiFePO_4$, Low Temperatures, Resistive Heating, PWM, PI Control.

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a crescente demanda por fontes de energia sustentável, renovável e eficiente tem fomentado o desenvolvimento de tecnologias de armazenamento de energia seguras e sustentáveis, sendo uma das principais, as células de íons de lítio, substancialmente na demanda de veículos [1]. Estas células, quando associadas são chamadas baterias de íons de lítio, são dispositivos eletroquímicos que armazenam e liberam energia por meio do movimento de íons de lítio entre um eletrodo negativo (ânodo) e um eletrodo positivo (cátodo) durante os ciclos de carga e descarga [2].

Quando as células são expostas a condições frias, podem sofrer uma redução significativa na capacidade e eficiência, o que limita seu uso em ambientes de temperaturas baixas, como áreas confinadas sob refrigeração e altitudes elevadas, além de afetar a operação de veículos elétricos em climas frios [3]. O uso dessas células em baixas temperaturas pode causar danos permanentes das células e até mesmo explosões pela formação de dendritos, que podem perfurar o separador causando curto-circuito [4].

Este trabalho teve como explorar soluções que possam mitigar esses efeitos adversos, para uso de baterias de íons de lítio em empilhadeiras que operam em ambientes frigoríficos. Foram avaliadas estratégias de um sistema de aquecimento das células para melhorar a performance e a segurança das células em baixas temperaturas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O desempenho de baterias de íons de lítio pode ser significativamente afetado por condições ambientais adversas, especialmente em ambientes com baixas temperaturas. Nessas condições, é comum observar uma redução na capacidade de carga das baterias, o que impacta diretamente o tempo de operação de equipamentos que dependem delas, como empilhadeiras elétricas.

A capacidade de uma bateria, medida em ampere-hora (Ah), representa a quantidade de carga elétrica que ela pode armazenar e fornecer ao longo do tempo. Em temperaturas baixas, as reações químicas das baterias de íons de lítio são afetadas, resultando em uma diminuição da eficiência de conversão de energia e, consequentemente, em uma redução da capacidade disponível [5].

A resistência interna da célula é um fator crucial que influencia sua eficiência e desempenho. Ela é composta pela resistência do eletrólito, as resistências de contato nos eletrodos e a resistência interna dos materiais do ânodo e cátodo. A resistência interna tende a aumentar em baixas temperaturas, o que pode impactar negativamente o desempenho da célula, especialmente em aplicações onde a eficiência energética é crítica [6].

2.1. Célula $LiFePO_4$

As células de LiFePO4 são conhecidas por sua operação segura, estabilidade térmica e longa vida útil. O material do cátodo é composto de fosfato de ferro e lítio (LiFePO4), que possui uma estrutura cristalina que permite uma boa mobilidade dos íons de lítio, resultando em uma descarga estável e eficiente. Essas células têm uma tensão nominal de 3,2 V, a curva de tensão de descarga é de 3,4 V até 2,0 V, conforme a figura 1. Essas células são menos propensas a sobreaquecimento ou explosão em comparação com outras químicas de íons de lítio [7] [8].

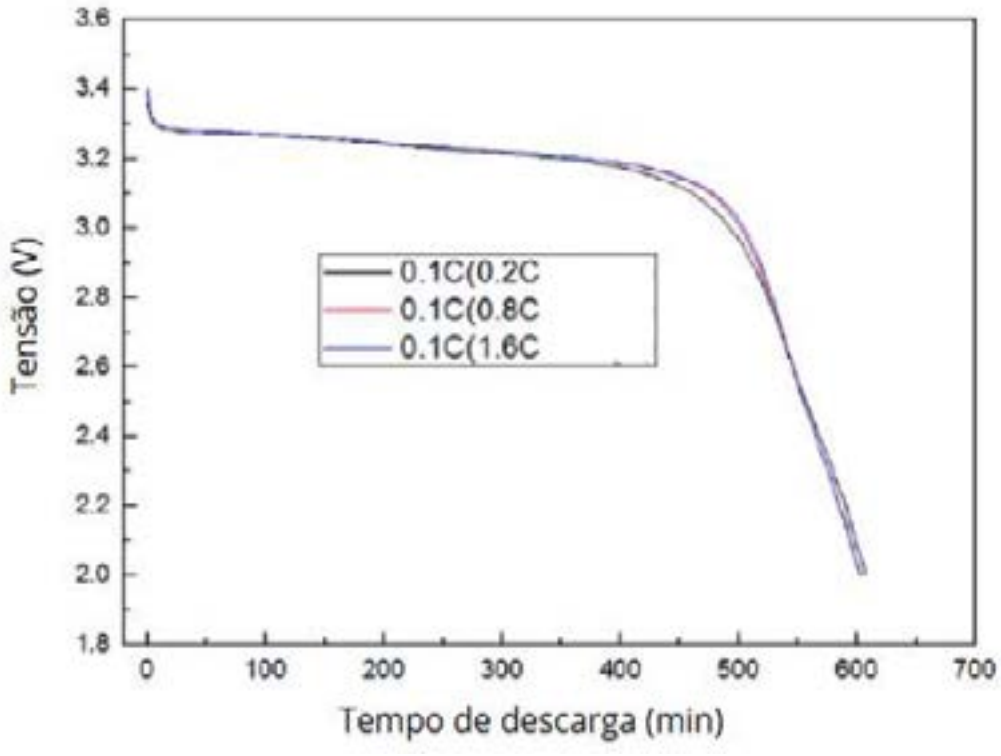


Figura 1: Curva de tensão de descarga da célula de íons de lítio LiFePO4. Fonte:(Yi et al., 2018).

2.2. Sistema do Controle PWM e PI

O controle de temperatura em sistemas eletroeletrônicos, como o

aquecimento de baterias de íons de lítio, frequentemente utiliza a modulação por largura de pulso (PWM – Pulse Width Modulation) combinada a controladores do tipo proporcional-integral (PI). Essa associação permite controlar com precisão a potência entregue a um atuador térmico (como mantas ou resistências), otimizando o tempo de resposta e minimizando o erro em regime permanente [9].

A técnica PWM consiste na variação da largura do pulso de um sinal digital de frequência constante. Por meio da alteração do duty cycle (ciclo de trabalho), é possível controlar a potência média entregue a uma carga. Por exemplo, um sinal com 50% de duty cycle permanecerá ligado metade do tempo e desligado na outra metade, resultando em uma potência média de 50% da máxima possível [10]. Esse método é amplamente utilizado devido à sua eficiência energética e simplicidade de implementação com microcontroladores.

Já o controle PI é um tipo de controle em malha fechada que atua com base no erro entre o valor de referência (temperatura desejada) e o valor medido (temperatura real). O termo proporcional (P) aplica uma correção proporcional à magnitude do erro instantâneo, enquanto o termo integral (I) acumula o erro ao longo do tempo, corrigindo desvios persistentes que o componente proporcional não consegue eliminar. O controlador atua com base no erro térmico instantâneo $e(t)$, conforme a Equação 1:

$$e(t) = T_{ref} - T(t) \quad (1)$$

onde Tref é o valor de referência (set point) e T(t) é a temperatura medida no instante t.

A saída de controle s(t), que neste caso corresponde ao duty cycle do sinal PWM aplicado ao aquecedor, é determinada pela soma das ações proporcional e integral, conforme a Equação 2:

$$s(t) = K_p \, . \, e(t) + K_i . \int_0^t e(t)\, dt \quad (2)$$

onde Kp é o ganho proporcional e o Ki é o ganho integral.

Em sistemas com controle PI-PWM, o valor calculado pela ação PI é utilizado para ajustar dinamicamente o duty cycle do PWM, aumentando ou reduzindo a potência aplicada ao elemento de aquecimento, de modo a atingir e manter a temperatura alvo com estabilidade. Assim, a combinação entre PI e PWM resulta em um sistema de controle robusto, capaz de garantir desempenho térmico adequado com economia de energia.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Caracterização elétrica da célula de íons de lítio

A célula de LiFePO4 com capacidade nominal de 6Ah, foi escolhida para os ensaios devido ao seu pequeno tamanho e a alta densidade energética. Essa célula é do tipo cilíndrica, com 26 mm de diâmetro e 65 mm de altura, possui dois polos elétricos distintos, o positivo na parte superior e o negativo na parte

inferior. As características desta célula são detalhadas na Tabela 1.

Tabela 1: Características da Célula $LiFePO_4$ usada no ensaio.

Parâmetros	Valor	Parâmetros	Valor
Capacidade Nominal	6Ah	Temperatura de carga	0°C to 60°C
Tensão Nominal	3,2V	Temperatura de descarga	-20°C to 60°C
Corrente Nominal	6Ah	Altura	25 mm
Tensão de carga de corte	3,65V	Diâmetro	26 mm
Tensão de descarga de corte	2,0V	Peso	300 g

3.2 Sistema eletrônico de monitoramento da bateria (BMS)

Neste estudo foi utilizado um BMS (Battery Management System) comercial da marca Daly, modelo Smart, para baterias de oito células em série e corrente máxima de carga e descarga de 150 A, com monitoramento de temperatura por dois sensores termopar. Durante o uso da bateria o BMS faz o controle das condições físicas, como as tensões máximas e mínimas das células, a temperatura do conjunto e corrente máxima, seja durante a carga ou descarga da bateria.

3.3 Sistema de aquecimento e de isolamento da bateria

Para manter a temperatura interna da bateria dentro da faixa desejada, foi utilizado um sistema de controle PI (Proporcional-Integral) combinado com modulação por largura de pulso (PWM) sobre aquecedores térmicos. O sistema utilizado possui seis controles independentes, cada um deles com um sensor de temperatura do tipo termopar do tipo J, com erro de ± 2°C. O elemento aquecedor utilizado do sistema é uma resistência elétrica encapsulada em um invólucro flexível de silicone (Polidimetilsiloxano), conhecida comercialmente como manta térmica de silicone. Como fonte de energia elétrica para os aquecedores foi utilizado o DC Source Meter, da marca Maynuo, modelo M8874, com capacidade de 100V de tensão e 11 A de corrente. A alimentação dos aquecedores foi ajustada para 24 V e 10 A, conforme indicações do fabricante.

Para armazenamento de todos os elementos, foi utilizado uma caixa metálica de aço com 2 mm de espessura, com as seguintes dimensões, altura de 250 mm, largura de 250 mm e profundidade de 740 mm, pintada com tinta epóxi. No interior da caixa foram utilizadas três camadas de isolação. A estrutura principal foi construída com placas de Poliestireno Expandido (EPS), um polímero celular rígido de baixa condutividade térmica. Complementarmente, o conjunto foi envolvido por uma manta de isolamento com duas faces de folha de alumínio.

3.4 Equipamentos utilizados nos ensaios

Foi utilizado o equipamento Cell Testing System (CTS), da marca Neware Battery Tester, modelo CE-6000 para carga e descarga da bateria. Esse sistema possui conversores de tensão de Corrente Alternada (AC) para Corrente Contínua (DC) para carga e descarga. O sistema dispõe de oito canais de leitura

de temperatura, com sensores termopar com a precisão de ±2°C. Todos os valores gerados ou medidos desse equipamento atendem as tolerâncias de medição especificadas pela norma NBR 16975 [12].

Para os ensaios em baixa temperatura (-20°C ± 2°C) foi adaptado um freezer horizontal doméstico (ECOGELO) com volume interno 282 litros (LxAxP 112 x 85 x 64 cm). Nos ensaios das células, para evitar a troca térmica entre o interior do freezer e o ambiente externo,

3.5 Ensaios de descarga

Antes dos ensaios de descarga da bateria devem ser carregadas em temperatura ambiente (25°C ± 3°C), até atingir a tensão elétrica estabelecida [12]. Foram feitos dois tipos de ensaios de descarga, sendo o primeiro em temperatura ambiente (25°C ± 3°C) e outros três ensaios em baixa temperatura (-20°C). No primeiro ensaio de descarga em baixa temperatura a célula (25°C ±3°C) foi colocada no freezer (-20°C ±2°C) aguardado 24 horas e foi feita a descarga.

4. RESULTADOS

O primeiro ensaio da descarga do pack de baterias de $LiFePO_4$ foi com corrente constante de 30 A, visando a utilização de sua capacidade total de 30Ah, em temperatura ambiente de 25 ± 2°C. Na figura 2 (curva BTA) observe-se estabilidade na tensão de 24 V por 52 minutos.

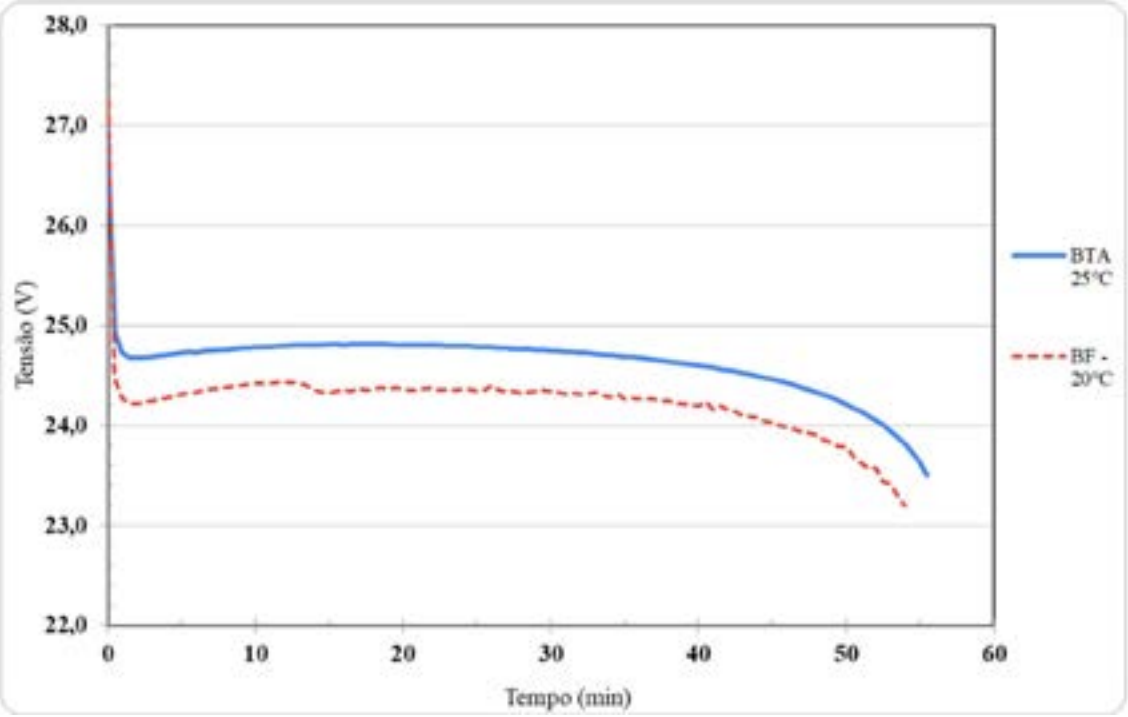


Figura 2: Comparação da tensão de descarga da bateria em temperatura ambiente (BTA) e em baixa temperatura (BF).

No segundo ensaio, realizado com a Bateria dentro do Freezer a temperatura de -20°C. A tensão de descarga da bateria foi próxima ao ensaio

anterior, conforme observado no gráfico 2 (linha BF), com a diferença apenas ao final do ensaio, em que a bateria atinge a tensão abaixo dos 24 V aos 50 minutos e 30 segundos. A tensão de corte de 20 V foi atingida aos 55 minutos, resultando na capacidade total de 28,98 Ah, sendo praticamente 2 minutos a menos que no ensaio de temperatura ambiente e 0,54 Ah a menos de capacidade.

A figura 3 mostra a variação das temperaturas nos oitos sensores (T1 a T8) instalados em diferentes pontos do sistema (ver figura 1). A isolação da caixa metálica e os aquecedores, se mostraram eficientes em manter a temperatura interna, com mínima de 10°C de temperatura no fundo da caixa após 24 horas de estabilidade térmica no freezer.

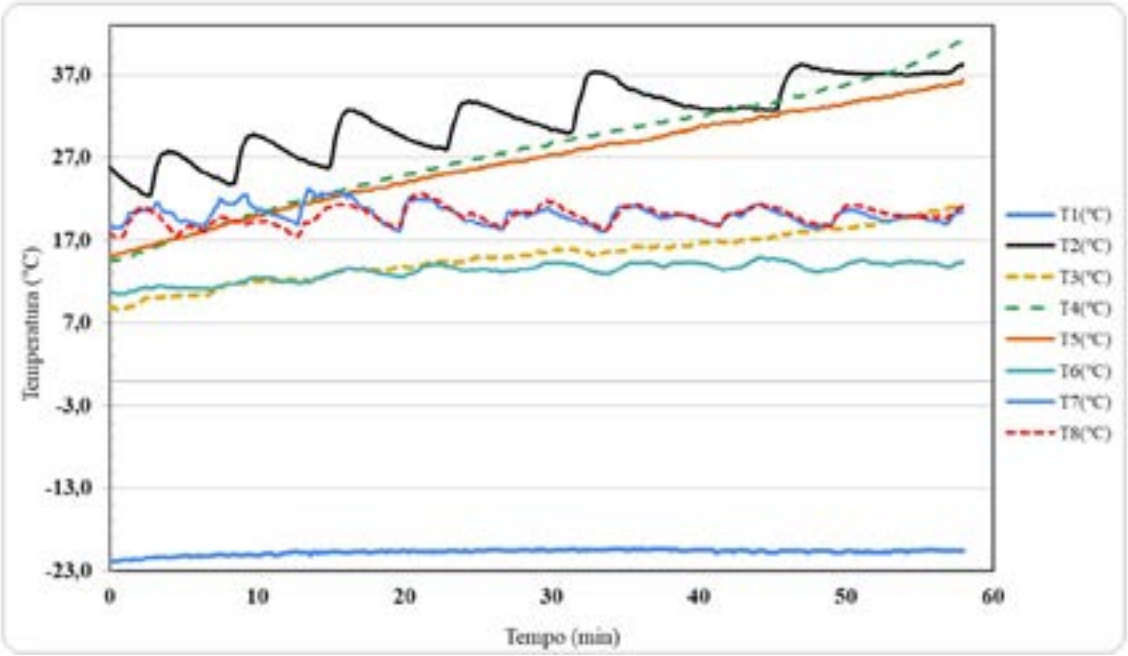


Figura 3: Variações de temperatura em diferentes pontos do sistema, durante o teste de bateria realizado em baixa temperatura (BF, -20°C).

5. CONCLUSÃO

O sistema de aquecimento ativo com controle PI-PWM manteve com sucesso a temperatura interna em uma faixa operacional ótima, assegurando um desempenho próximo ao nominal, resultando numa pequena queda da capacidade nominal (1,83%). As implicações práticas deste estudo são diretas para a aplicação de baterias de íon-lítio em veículos industriais (empilhadeiras) que operam em ambientes frigoríficos. O trabalho não apenas quantifica os desafios, mas também valida um projeto de engenharia completo, desde a lógica de controle até o posicionamento estratégico dos aquecedores para aproveitar a convecção.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à FINEP pelo financiamento do projeto, à

empresa GlobalBat por sua valiosa colaboração e à PUCRS por seu incentivo contínuo à pesquisa e ao desenvolvimento acadêmico.

References

[1] NGOY, Kitalu Ricin et al. Lithium-ion batteries and the future of sustainable energy: A comprehensive review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 223, p. 115971, 1 nov. 2025.

[2] NASAJPOUR-ESFAHANI, Navid et al. Comprehensive review of lithium-ion battery materials and development challenges. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 203, p. 114783, 1 out. 2024.

[3] MADANI, Seyed Saeed et al. A Comprehensive Review on Lithium-Ion Battery Lifetime Prediction and Aging Mechanism Analysis. Batteries 2025, Vol. 11, Page 127, v. 11, n. 4, p. 127, 26 mar. 2025.

[4] CHANG, Wonyoung et al. Low temperature performance of LiFePO4 cathode material for Li-ion batteries. Journal of Alloys and Compounds, v. 563, p. 249–253, 25 jun. 2013.

[5] CHEN, Yuqing et al. A review of lithium-ion battery safety concerns: The issues, strategies, and testing standards. Journal of Energy Chemistry, v. 59, p. 83–99, 1 ago. 2021.

[6] CHEN, Ke; LUO, Jiayuan; HUANG, Yuqi. Impact of low temperature exposure on lithium-ion batteries: A multi-scale study of performance degradation, predictive signals and underlying mechanisms. Chemical Engineering Journal, v. 503, p. 158260, 1 jan. 2025b.

[7] NEKAHI, Atiyeh et al. Sustainable LiFePO4 and LiMnxFe1-xPO4 (x=0.1–1) cathode materials for lithium-ion batteries: A systematic review from mine to chassis. Materials Science and Engineering: R: Reports, v. 159, p. 100797, 1 jun. 2024.

[8] ZHU, G. ;. et al. The Modeling and SOC Estimation of a LiFePO4 Battery Considering the Relaxation and Overshoot of Polarization Voltage. Batteries 2023, Vol. 9, Page 369, v. 9, n. 7, p. 369, 9 jul. 2023.

[9] LI, Junqiu et al. Frequency varying heating strategy for lithium-ion battery rapid preheating under subzero temperature considering the limitation of on-board current. Applied Energy, v. 365, p. 123183, 1 jul. 2024.

[10] LIU, Binghe et al. Safety issues and mechanisms of lithium-ion battery cell upon mechanical abusive loading: A review. Energy Storage Materials, v. 24, p. 85–112, 1 jan. 2020.

[11] SOLTANPOUR, M.; YANAGIMOTO, J. Material data for the kinetics of microstructure evolution of Cr-Mo-V steel in hot forming. J. Mater. Process. Technol., 417-426 (2012) 212.

[12] ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (Brazilian Association of Technical Standards). NBR 16975: Secondary lithium cells and batteries for stationary applications - Electrical specification and test methods. Rio de Janeiro, 2022

44º SENAFOR

28th International Forging Conference
13th International Sheet Metal Forming Conference / 10th BrDDRG Congress
13th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies – Brazil/RS
2nd International Conference on Innovation in Materials and Manufacturing
Hotel Plaza São Rafael – P. Alegre RS, October 1-3, 2025

ALTERNATIVA PARA RECICLAGEM DE NÚCLEOS DE FERRITA PARA INDUTORES VIA MODELAMENTO E IMPRESSÃO 3D

Eduardo Duarte Cabral - Autor [1]
Henrique Gabriel Cabral - Autor [2]
Jorge Pimentel de Morais - Autor [3]
Lucas Melo Machado - Autor [4]
Maria do Carmo Vieira - Orientadora[5]
Marçal Rodrigues Pires - Orientador [6]
Vicente Mariano Canalli - Orientador [7]

RESUMO

Inicia-se o artigo descrevendo as principais funções dos indutores de ferrita nos conversores de potência CC-CC – Corrente Continua para Corrente Contínua não isolados. Um roteiro para o projeto do indutor de um conversor redutor elevador é apresentado com base na literatura. Uma alternativa para moldagem de núcleos de indutores de alta-frequência, orientada a reutilização de sucatas de ferrita é apresentada, utilizando ferramentas de projeto assistido por computador ou CAD – *Computer Aided Design* e impressão 3D. Entraves encontrados no modelamento de formas padronizadas para ferritas comerciais são descritos. A construção do indutores para operação em alta frequência é descrita Testes são propostos para os indutores elaborados..

Palavras Chave — Reciclagem, Núcleos de ferrita, CAD, Impressão 3D, Indutor

[1] Electrical Engineering Student; Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul, Brazil
[2] Electrical Engineering Master; Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul, Brazil
[3] Mechanical Engineer, CNPq - Energy and Gas Application Group, Brazil
[4] Materials Master's Student - Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul, Brazil
[5] Doctoral Engineer - CNPq - Energy and Gas Application Group, Brazil
[6] Professor Doctor Engineer - Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul, Brazil.
[7] Doctor Engineer - SSRC-VC – Space for Science, Research and Culture V. Canali, Brazil.

ALTERNATIVE FOR RECYCLING INDUCTOR FERRITE CORES VIA 3D MODELING AND PRINTING

Eduardo Duarte Cabral - Author (1)
Henrique Gabriel Cabral - Autor (2)
Jorge Pimentel de Morais - Author (3)
Lucas Melo Machado - Author (4)
Maria do Carmo Vieira - Adviser (5)
Marçal Rodrigues Pires - Adviser (6)
Vicente Mariano Canalli - Adviser (7)

ABSTRACT

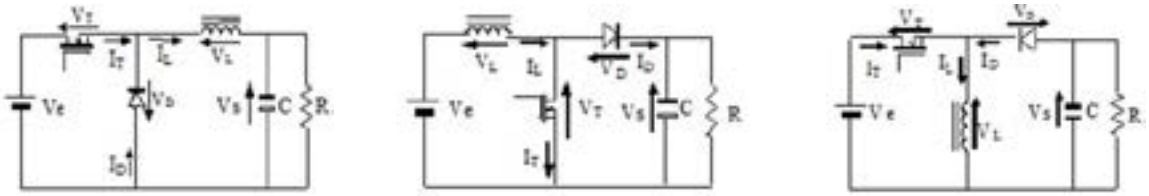
The article begins by describing the main functions of ferrite inductors in non-isolated DC-DC power converters. A roadmap for the inductor design of a step-up converter is presented, based on the literature. An alternative for molding high-frequency inductor cores, oriented toward the reuse of ferrite scrap, is presented, using computer-aided design (CAD) and 3D printing tools. Obstacles encountered in modeling standardized shapes for commercial ferrites are described. The construction of inductors for high-frequency operation is described. Tests for the designed inductors are proposed.

1. INTRODUÇÃO

Com a constante evolução da eletrônica e da informática, diversos equipamentos como fontes tem sido descartados em um curto intervalo de tempo. Em alguns casos o manejo dos materiais pode gerar resíduos provenientes da quebra e descarte de componentes, como por exemplo os núcleos de indutores e transformadores que operam a alta frequência. Os núcleos destes transformadores são implementados em geral com a ferrita, que é uma cerâmica desenvolvida através da junção de oxido de ferro com outro óxido de níquel ou cobalto [1] . A ferrita é dificilmente aproveitada por métodos de fundição sendo nociva quando descartada diretamente na natureza. A ideia é empregar um processo artesanal, cujas etapas são descritas neste artigo. É proposto o emprego de uma impressora 3D para a construção de formas com distintas geometrias, destinadas a reciclagem de pedaços de núcleos de ferrita quebrados ou descartados. Para o futuro está previsto um estudo envolvendo parâmetros eletromagnéticos que são obtidos via medição parâmetros elétricos e magnéticos do núcleo implementado

2. PRINCIPAIS CONVERSORES CC-CC DE POTÊNCIA BÁSICOS

Os conversores CC-CC comutados básicos [2] , também são chamados de conversores não isolados ou transformadores de corrente continua. A estrutura de potência e denominação destes conversores á apresentada na figura 1. O exemplo de projeto do indutor descrito neste trabalho é para o conversor redutor-elevador ou *buck-boost* operando em modo contínuo.



(a) redutor ou *buck* (b) elevador ou boost (c) redutor elevador

Figura 1: Conversores CC-CC comutados básicos [2]

Destaca-se a operação destes conversores com modulação por largura de pulso, o modo de operação contínuo do conversor redutor da figura 2, com duas sequências de operação.

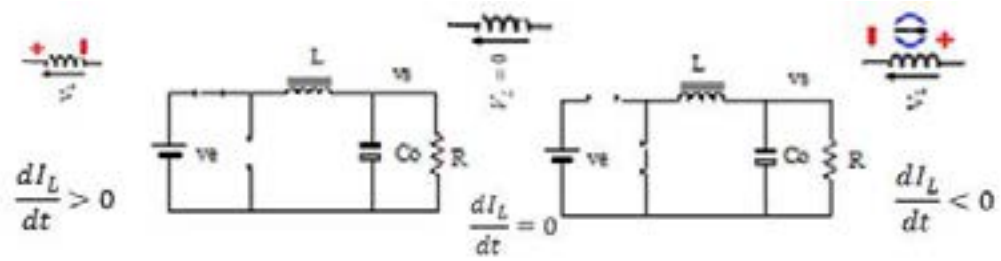


Figura 2: Sequências operação conversor redutor em modo contínuo [2]

No modo de condução descontínuo, não abordado neste artigo, o conversor opera com três sequências de operação sendo que sua relação de transformação é distinta daquela de modo continuo. O princípio de operação e a forma de onda nos indutores é similar nos conversores mais complexos, tendo em vista que destes conversores, derivam outras estruturas isoladas e com mais interruptores como ilustrado na figura 3

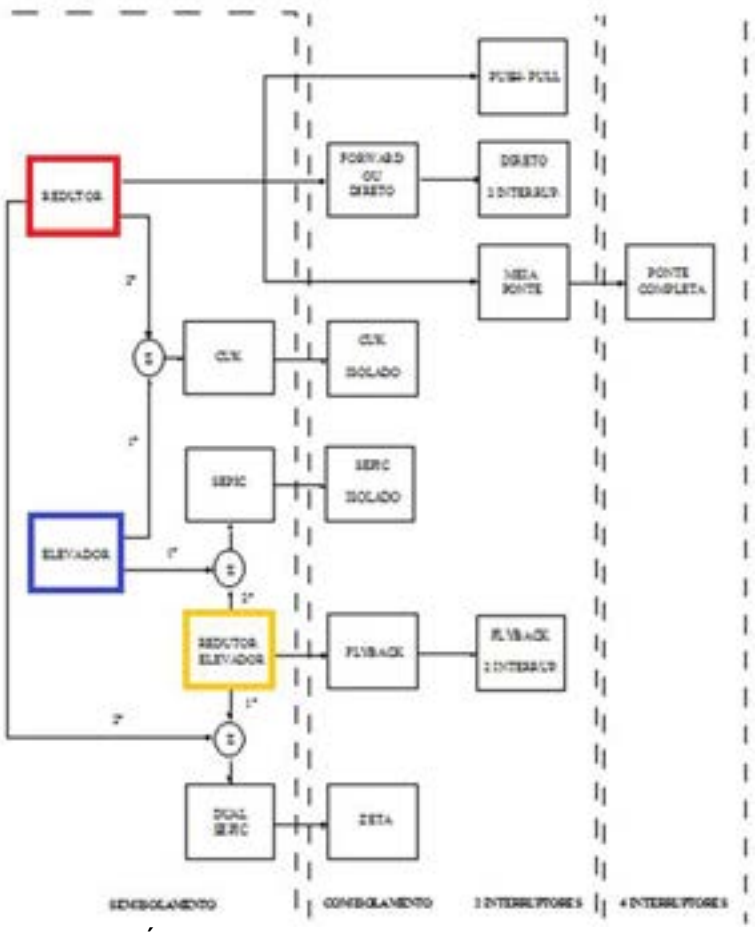
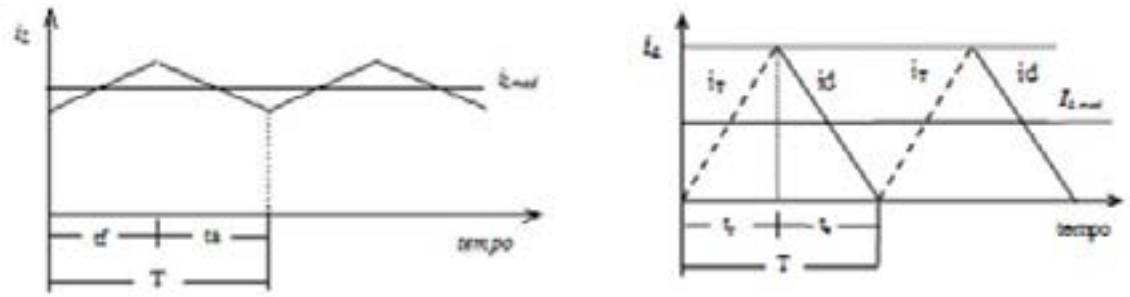


Figura 3: Árvore geradora dos conversores CC-CC [2]

3. FUNÇÃO DO INDUTOR EM CONVERSORES DE POTÊNCIA

Na área de Eletrônica de Potência o indutor opera em geral como um armazenador de energia. Em toda família de conversores CC-CC comutados operando com modulação por largura de pulso, os indutores armazenam energia enquanto o interruptor de potência está acionado, devolvendo a energia quando o mesmo é desligado. O comportamento do indutor foi ilustrado nas etapas de operação na figura 2. De acordo com a figura 4(a), no tempo de interruptor fechado tf, uma tensão é aplicada sobre o indutor que neste intervalo armazena energia, até que sua corrente, chega ao máximo com sua derivada nula. Quando o interruptor é desligado ou no tempo ta aberto, o interruptor descarrega na forma de uma fonte de corrente, como visto na figura 2(b), sobre o diodo da estrutura representada na figura 1(a).



(a)modo de operação continuo (b)modo de operação critico

Figura 4: Formas de onda da corrente no indutor [2]

4. PROJETO DO INDUTOR DE UM CONVERSOR REDUTOR ELEVADOR

No projeto do indutor [3]-[5] é considerada a indutância e a energia máxima a ser armazenada

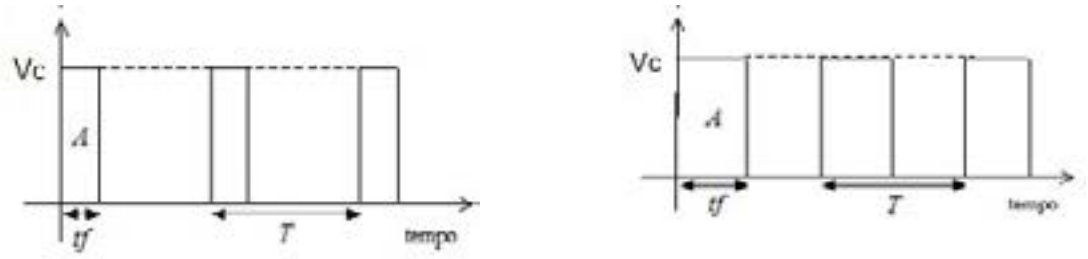
4.1. Frequência de operação

A frequência de operação f em Hz, normalmente é escolhida no limite superior da faixa audível em 20kHz, para simplificar o processo de comutação

4.2. Determinação da indutância L

O cálculo do indutor depende da tensão de entrada Ve em V, e do ciclo de trabalho ou *duty cycle* d que pode variar conforme a tensão de comando Vc, como ilustrado na figura 5.

$$d = \partial = \frac{t_f}{T} \tag{1}$$



(a) menor *duty cycle* e tensão de saída e (b) maior *duty cycle* e tensão de saída

Figura 5: Variação do ciclo de trabalho na modulação por largura de pulso

O cálculo da indutância é realizado via expressão (2) no modo de operação crítico que é o modo de operação onde a corrente do indutor zera em um ponto. Neste modo de operação é

calculada a corrente Is_{MIN} em A, acima da qual o conversor opera em modo continuo. Uma estratégia simples para fixar o modo de operação contínuo em malha aberta, consiste em adicionar um resistor na saída do conversor, de forma a para garantir a circulação da corrente de saída mínima Is_{MIN}.

$$L \geq \frac{d \cdot (1-d) \cdot Ve}{2 \cdot Is_{MIN} \cdot f} = \frac{0{,}67 \cdot (1-0{,}67)}{2 \cdot 0{,}25 \cdot 20.000} = 2{,}65 \cdot 10^{-4}\, H = 265 \mu H \quad (2)$$

4.2 Energia máxima E_{MAX} armazenada pelo indutor

O projeto do indutor considera também a energia máxima armazenada durante um ciclo de operação do conversor, calculada usando a expressão (3)

$$E_{MAX} = \frac{1}{2} \cdot L \cdot (I_{LMAX})^2 = \frac{1}{2} \cdot 2{,}65 \cdot 10^{-4} \cdot (6{,}75)^2 = 7{,}84 mJ \quad (3)$$

5. FATORES USADOS NA ESPECIFICAÇÃO DO NÚCLEO DE FERRITE COMERCIAL

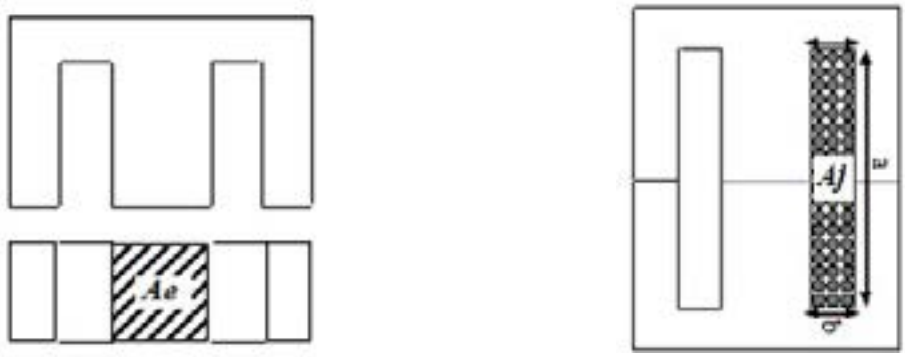
Na sequência, de acordo com Melo [3]-[5], são apresentados diversos parâmetros utilizados no projeto de indutores de conversores CC-CC

5.1. Densidade de fluxo magnético máxima Bmax

A densidade de fluxo magnética máxima ou indução Bmax típica utilizada no dimensionamento é de 300mT ou mWb/m^2. Essa densidade de fluxo baixa é compensada pelo incremento da frequência de operação do transformador.

5.2. Área efetiva da perna central Ae

A figura 6(a) ilustra a área efetiva da perna central *Ae* dada em m^2 e a figura 6(b) a área da janela *Aj*, também em m^2, onde são posicionados os condutores do enrolamento.



(a) Área efetiva da coluna central (b) Área da janela

Figura 6: Dados geométricos do núcleo [6]

5.3. Fator de utilização da janela pelo enrolamento Ku

Para construir os indutores os núcleos E são utilizados aos pares como ilustra a figura 6(b) O fator Ku considera a ocupação desta janelas pelos condutores do enrlamento.. Para uma ocupação de 80%, considera-se um Ku igual a 0,8.

5.4. Coeficiente de densidade de corrente nos fios Kj

O coeficiente de densidade de corrente nos fios Kj é calculado usando a expressão (4).

$$Kj = 63{,}35 \cdot \Delta T^{0{,}54} = 63{,}35 \cdot 30^{0{,}54} = 397 \frac{A}{cm^2} \quad (4)$$

5.5. Determinação do produto de áreas *Ap*

O significado físico do produto de áreas Ap do núcleo do indutor ,dado pela expressão (5), corresponde ao produto entre a área efetiva da perna central *Ae* e a área da janela *Aj*, ambas ilustradas na figura 6.

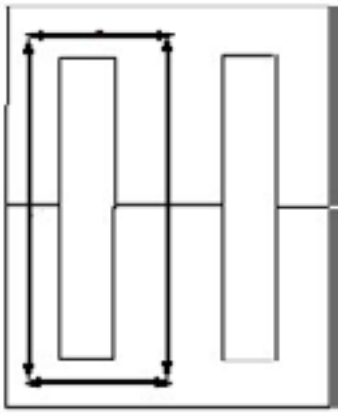
$$Ap = Ae \cdot Aj \quad (5)$$

O cálculo do produto de áreas pode ser realizado analiticamente por meio de uma expressão dada em Mello [3] que considera influências físicas no transformador via coeficiente Z.

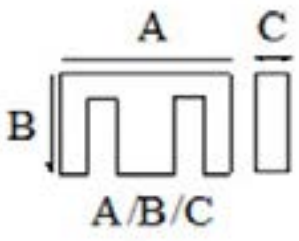
$$Ap = \left(\frac{E_{MAX} \cdot 10^4}{Ku \cdot Kj \cdot B_{MAX} \cdot d} \right)^Z = \left(\frac{7{,}84 \cdot 10^{-3} \cdot 10^4}{0{,}8 \cdot 397 \cdot 0{,}3 \cdot 0{,}67} \right)^{1{,}136} = 1{,}23 cm^4 \quad (6)$$

5.6. Comprimento médio ℓe e dimensões padronizadas para o núcleo E

A figura 7(a) ilustra o comprimento médio ℓe e a figura 7(b) a especificação das três dimensões físicas dada em milímetros padronizadas para o núcleo E.



(a) caminho médio ℓe do núcleo



(b) dimensões padronizadas do E em mm

Figura 7: Especificações de medidas de um núcleo EE [6]

5.7. Critério para escolha do produto de áreas do núcleo fornecido pelo fabricante [7]:

As dimensões físicas de alguns núcleos comerciais, os valores do produto de áreas $Ap_{COMERCIAL}$ em cm^4, e do comprimento médio ℓe , são apresentados no quadro 1:

NÚCLEO	**20/10/5**	**30/15/7**	**30/15/14**	**42/21/15**
Ae(cm^2)	0,312	0,6	1,2	1,82
$Ap_{COMERCIAL}$ (cm^4)	0,165	0,77	1,43	4,66
ℓe (cm)	4,28	6,69	6,69	9,7

Quadro 1: Dados de medidas de núcleos EE comerciais [6]

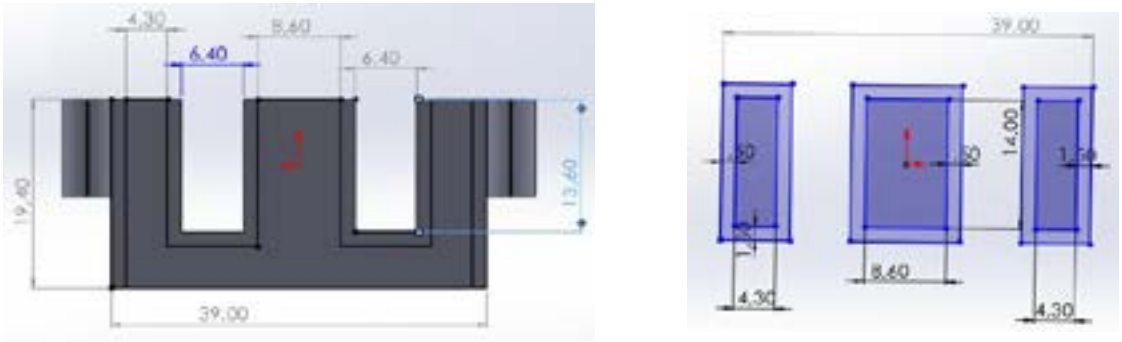
Assim, adota-se um $Ap_{COMERCIAL}$ de 1,43cm^4 imediatamente superior a 1,23cm^2, calculado com o uso da expressão (6), levando à escolha de um núcleo E30/15/14 disponibilizado

comercialmente pelo fabricante [7], que será o núcleo cuja forma é modelada neste trabalho. Este núcleo tem uma Ae ou área efetiva da perna central de 1,20cm^2

6. PROJETO CAD DA FORMA PARA O NÚCLEO DO INDUTOR

A figura 8 ilustra as dimensões ajustadas para o projeto CAD da forma do núcleo do indutor utilizando o software *SolidWorks.* Um dos fatores limitantes é a espessura mínima ***e***, de 1,5mm, obtida na impressão das paredes.

Os 30mm foram acrescidos de 9mm tendo em vista a existência de seis paredes verticais na forma, totalizando 39mm. A profundidade p de 14mm sofreu um acréscimo de 3mm, tendo em vista as duas paredes laterais da forma.



(a) vista lateral (b) corte

Figura 8: Medidas do projeto CAD da forma para o núcleo do indutor E30/15/14

Ajustando uma área efetiva *Ae* de 1,2cm^2 ou 120mm^2 segundo dado do fabricante apresentado no quadro 1, foi possível calcular a largura da coluna central usando (7)

$$lc = \frac{Ae}{p} = \frac{1{,}20\,mm^{2}}{14\,mm} \cong 8{,}6\,mm \tag{7}$$

Visando manter a mesma densidade de fluxo no transformador a largura l_L das colunas laterais resultou 4,3mm ou seja, a metade daquela calculada para a coluna central.
A dimensão horizontal original da janela *hj* pode ser calculada usando a expressão (8)

$$hj = \frac{A - 2 \cdot lc}{2} = \frac{30mm - (2 \cdot 8{,}6mm)}{2} = 6{,}4mm \tag{8}$$

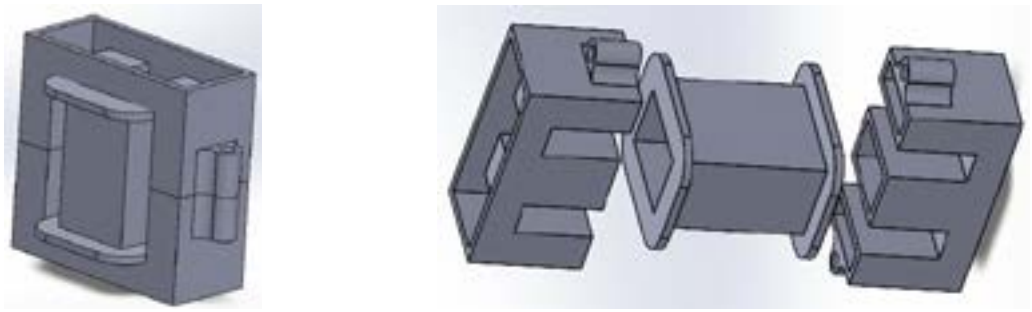
O produto de áreas dado na expressão (5) para o núcleo E30/15/14 é de 1,43cm^4. Então é possível calcular a área total da janela usando a expressão (9) obtida de (5):

$$Aj = \frac{Ap}{Ae} = \frac{1{,}43\,cm^{4}}{1{,}2\,cm^{2}} \cong 1{,}19\,cm^{2} \tag{9}$$

Considerando uma área de janela para um único E de 59,5cm^2, é importante lembrar que o carretel ocupa uma dimensão na horizontal e na vertical. Assim a dimensão vertical da janela *vj* é calculada usando a expressão (10)

$$vj = \frac{Aj\ /\ 2}{hj - e} + e = \frac{59{,}5\,mm^{2}}{6{,}4 - 1{,}5} + 1{,}5 \cong 13{,}6\,mm \tag{10}$$

Na figura 9 estão duas vistas do projeto CAD tridimensional do núcleo E30/15/14.



(a) vista do núcleo (b) vista explodida

Figura 9: Projeto CAD tridimensional da forma para o núcleo do indutor E30/15/14

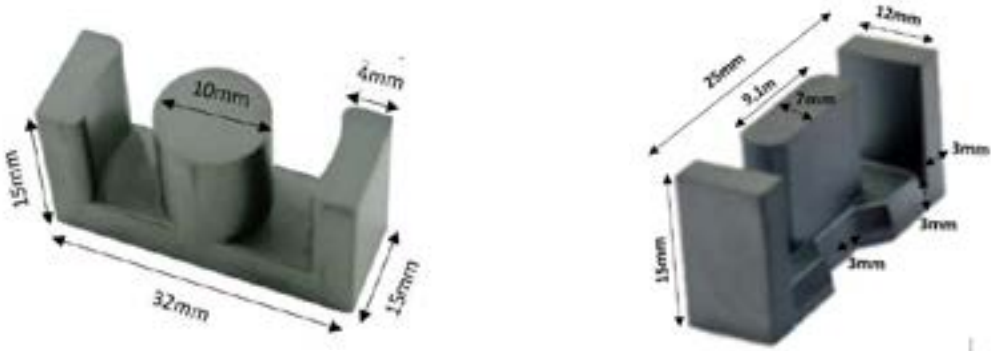
7. IMPRESSÃO 3D DE FORMA PARA RECICLAGEM DO NÚCLEO DO INDUTOR

A figura 10 apresenta fotografias da forma obtida para o núcleo E de dimensões comerciais, utilizando impressão 3D.

Figura 10: Impressão 3D da forma para o núcleo do indutor

8. ENTRAVES NA MOLDAGEM DE NÚCLEOS DE ALGUMAS FERRITAS COMERCIAIS

Em função da espessura mínima de impressão, alguns tipos de núcleos comerciais como os ilustrados na figura 11 demonstraram ser incompatíveis com o ferramental de impressão 3D utilizado, tendo em vista suas formas geométricas complexas e dimensões reduzidas.



(a) EF-32 (b) EFD-25

Figura 11: Núcleos de ferrita comerciais difíceis moldar com impressão 3D

10. RECICLAGEM DA FERRITA E COMPACTAÇÃO DO NÚCLEO

Visando a reciclagem, a ideia é seguir o projeto utilizando pedaços de ferrita disponíveis na forma de sucata moídos na com uma textura de pó, e a utilização de um catalisador e resina utilizados para aglutinação do material. A vantagem da forma desenvolvida é de permitir testar diferentes composições visando a reciclagem. Testes em bancada permitirão avaliar parâmetros elétricos e magnéticos e o novo fator de ocupação.

CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentada uma revisão dos principais conversores CC-CC comutados, com o objetivo de identificar variáveis importantes no projeto do indutor. As principais expressões foram descritas e ilustradas no trabalho com base na literatura. Foi apresentado o dimensionamento analítico de um indutor destinado a construção de um conversor CC-CC redutor elevador. No dimensionamento chegou-se as dimensões de um núcleo do tipo E, disponível comercialmente para orientar o projeto da forma. Buscando uma alternativa para reciclagem de núcleos quebrados ou sucateados, foi realizado o projeto CAD de uma forma, com o objetivo de moldar o núcleo, a partir do uso de um aglutinante e de fragmentos de ferrita. A forma projetada foi construída utilizando uma impressora 3D. Um carretel também foi projetado e impresso. Tendo em vista a espessura das paredes na impressão prevê-se um novo fator de ocupação para novos projetos. Devido a limitações técnicas de impressão verificou-se dificuldades na impressão de formas muito pequenas e com geometrias mais complexas, tendo em vista a espessura mínima obtida no processo. A ideia futura é utilizar a forma para o teste de diferentes composições de ferrite reciclado na forma de pó e aglutinantes, medindo-se parâmetros elétricos e magnéticos em bancada. Assim, cálculos iterativos e implementação de indutores poderão sugerir um novo fator de ocupação para este projeto.

AGRADECIMENTO

O grupo agradece o apoio dos organizadores do RENOMAT e em especial ao Prof. Lírio Schaeffer, pelo incentivo às iniciativas.

Referências

[1] CALLISTER JR W.D., Fundamentos da Ciência e Engenharia dos materiais, LTC, 2006

[2] CANALLI V.M., Apostila de Conversores CC-CC Isolados, ECPCVC, 2025

[3] MELLO L.F.P., Projeto de Fontes Chaveadas, Editora Érica, 1987

[4] MELLO L.F.P., Análise e Projeto de Fontes Chaveadas, Editora Érica, 1996

[5] MELLO L.F.P., Projeto de Fontes Chaveadas, Editora Érica, 2011

[6] CANALLI V.M., Apostila de Projeto de Indutores, ECPC-VC, 2025

[7] THORNTON ELETRÔNICA, Catálogo de Ferrites, 2025

[9] HARTMANN L. Análise, Implementação e Aplicação de Núcleo de Ferrita Reciclado em Circuito Conversor CC-CC Elevador, Trabalho de Conclusão, PUCRS, 2017/1

[10] DA SILVA R.G. – Núcleos toroidais – Faça-os você mesmo, Eletrônica Popular, Abril 1962

44º SENAFOR

28th International Forging Conference
13th International Sheet Metal Forming Conference / 10th BrDDRG Congress
13th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies – Brazil/RS
2nd International Conference on Innovation in Materials and Manufacturing
Hotel Plaza São Rafael – P. Alegre RS, October 1-3, 2025

FORMA PARA CUSTOMIZAÇÃO DE NÚCLEO DE TRANSFORMADOR DE CONVERSOR DE POTÊNCIA

Eduardo Duarte Cabral - Autor [1]
Henrique Gabriel Cabral - Autor [2]
Jorge Pimentel de Morais - Autor [3]
Lucas Melo Machado - Autor [4]
Maria do Carmo Vieira - Orientadora [5]
Marçal Rodrigues Pires - Orientador [6]
Vicente Mariano Canalli - Orientador [7]

RESUMO

Este artigo descreve as principais funções dos transformadores de ferrita e os principais conversores de potência CC-CC – Corrente Continua - Corrente Continua isolados. Os transformadores são importantes na conversão intermediária de alta-frequência e proporcionam operar como auxiliares na elevação e regulação de tensão. Um roteiro é descrito com base na literatura, para o projeto do transformador de um conversor *push pull* adaptado a conversão bidirecional. A conversão bidirecional é um fator importante e que permite reduzir e regular a tensão do barramento de um acionamento elétrico. Uma alternativa para moldagem customizada de núcleos de transformadores de alta-frequência e potência é apresentada, com vistas a reutilização de sucatas de ferrita. É empregado nesta técnica o projeto assistido por computador e impressão 3D. Neste caso um núcleo de potência distinto das ferritas comerciais é customizado. A forma do transformador de potência para operação em alta frequência é descrita.

Palavras Chave - Customização, Núcleo, Ferrita, Reciclagem, Transformador de potência

[1] Electrical Engineering Student; Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul, Brazil
[2] Electrical Engineering Master; Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul, Brazil
[3] Mechanical Engineer, CNPq - Energy and Gas Application Group, Brazil
[4] Materials Master's Student -, Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul, Brazil
[5] Doctoral Engineer - CNPq - Energy and Gas Application Group, Brazil
[6] Professor Doctor Engineer - Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul, Brazil.
[7] Doctor Engineer - SSRC-VC – Space for Science, Research and Culture V. Canali, Brazil.

.

CUSTOMIZATION FORM FOR POWER CONVERTER TRANSFORMER CORE

Eduardo Duarte Cabral - Author (1)
Henrique Gabriel Cabral - Autor (2)
Jorge Pimentel de Morais - Author (3)
Lucas Melo Machado - Author (4)
Maria do Carmo Vieira - Adviser (5)
Marçal Rodrigues Pires - Adviser (6)
Vicente Mariano Canalli - Adviser (7)

ABSTRACT

This article describes the main functions of ferrite transformers and the main isolated DC-DC power converters. Transformers are important in intermediate high-frequency conversion and provide auxiliary voltage boosting and regulation. A literature-based approach is described for the design of a push-pull converter transformer adapted for bidirectional conversion. Bidirectional conversion is an important factor that allows for reducing and regulating the bus voltage of an electrical drive. An alternative for custom molding cores for high-frequency power transformers is presented, aiming to reuse ferrite scrap. This technique employs computer-aided design and 3D printing. In this case, a power core distinct from commercial ferrites is customized. The shape of the power transformer for high-frequency operation is described..

1. INTRODUÇÃO

Veículos elétricos dedicados movidos por motores de corrente alternada são caracterizados pela presença de baterias e de um barramento intermediário como ilustrado na figura 1

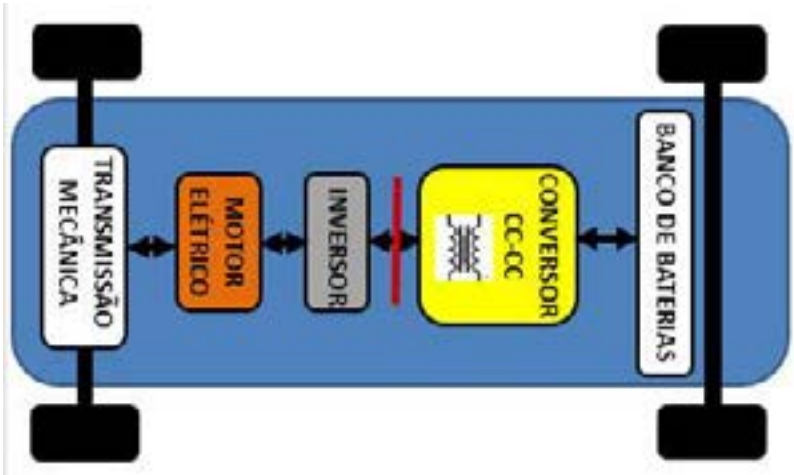


Figura 1: Conversor intermediário nos veículos elétricos [1]

Um problema pode ser originado por sobretensões que podem surgir da ação regenerativa do motor em declives, especialmente pela característica capacitiva do

barramento com capacidade de fornecimento de energia reativa. Desta forma segundo [1], é desejável que o conversor intermediário seja bidirecional em corrente, devendo ainda permitir o controle do fluxo de potência regulado em tensão do acionamento do veículo para a bateria mediante o controle do *duty cycle* ou ciclo de trabalho.

Porém o principal na utilização de baterias, além do peso são as quedas de tensão verificadas em função de sua característica I x V. A regulação da tensão no barramento intermediário pode ser uma das soluções para este problema, na medida que incorpore um conversor com capacidade de elevação de tensão por ocasião das quedas de tensão. Nesta função um dos principais dispositivos que surge é o transformador, que deve operar em alta-frequência. Tendo em vista a potência do acionamento pode ser necessário customizar o núcleo do transformador cuja potência poderá ser superior aos núcleos de potência de ferrita disponíveis comercialmente. Tendo-se em vista o apelo dos veículos elétricos, nada mais interessante do que tentar customizar o núcleo empregado em alta-frequência a partir de núcleos de ferrite danificados e descartados. Neste trabalho serão descritos tópicos e variáveis para o dimensionamento analítico deste tipo de transformador. Foi elaborado o projeto assistido por computador da forma para compactação do núcleo com o material reciclado.

2. PRINCIPAIS CONVERSORES CC-CC COM TRANSFORMADOR

A presença do transformador introduz a relação de transformação do transformador na expressão que relaciona a tensão de entrada e de saída dos principais conversores isolados, cujas estruturas são ilustradas na figura 2.

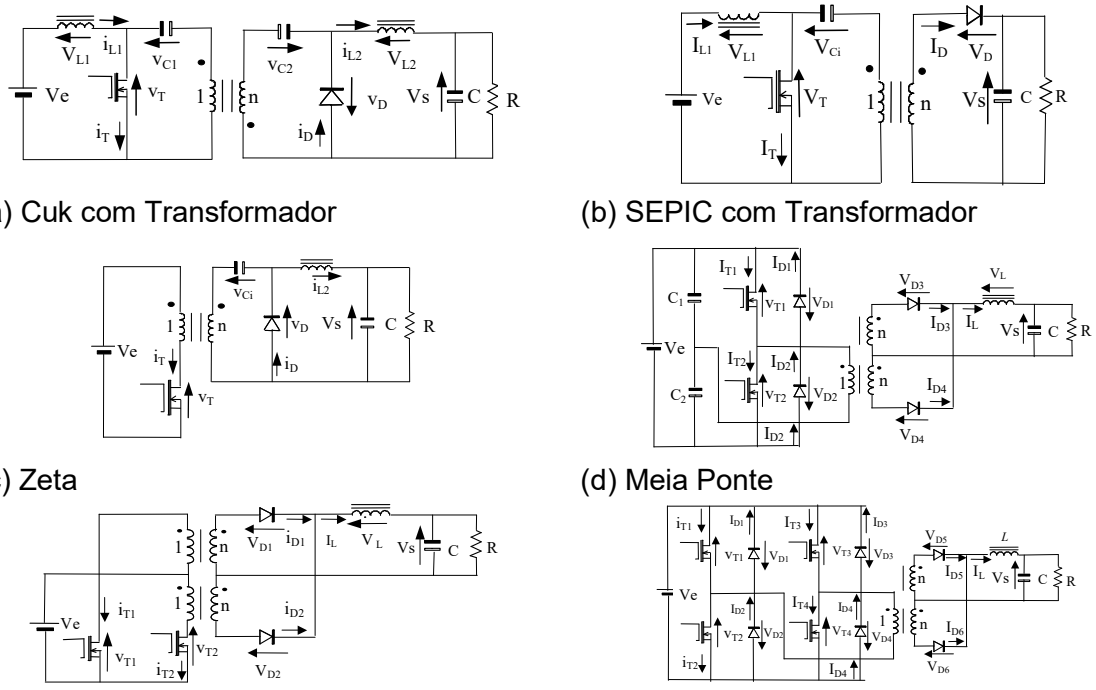


Figura 2: Principais conversores CC-CC isolados com transformador [2]

3. VANTAGENS DO CONVERSOR *PUSH PULL*

Dentre as vantagens do conversor escolhido, originado a partir do conversor redutor ou *buck* com incremento da isolação, está a dinâmica de controle simples. O uso de apenas dois interruptores com um ponto em comum facilita o comando, sendo que o transformador com quatro enrolamentos e alterações na estrutura de potência podem tornar este conversor reversível, permitindo fluxo de corrente nos dois sentidos.

4. CONVERSOR *PUSH PULL* BIDIRECIONAL

Uma versão da estrutura de potência de um conversor *push pull* bidirecional, considerando-se os diodos intrínsecos dos interruptores de potência e uma lógica de comutação que altera a topologia da estrutura é vista na figura 3

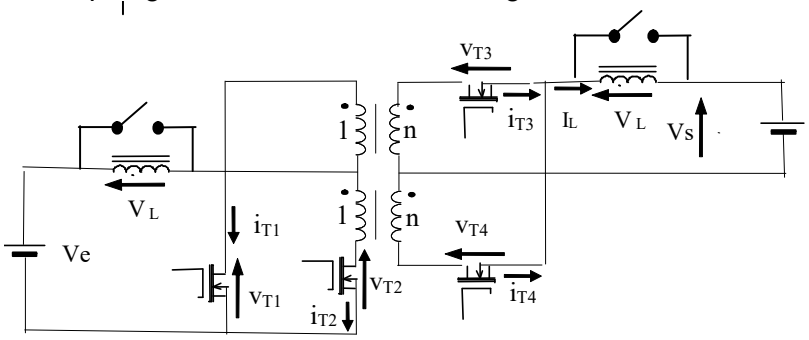


Figura 3: Estrutura e transformador de potência de um conversor *push-pull* bidirecional [3]

5. DIMENSIONAMENTO ANALÍTICO DO NÚCLEO DO TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA

O foco deste artigo está no dimensionamento e definição das dimensões de uma forma para o núcleo customizado do transformador a ser projetado para uma potência superior à dos núcleos comerciais, com base em [4]-[6]

5.1. Densidade de fluxo magnético máxima Bmax

A densidade de fluxo magnética máxima ou indução Bmax típica utilizada no dimensionamento é de 300mT ou Wb/m^2. Essa densidade de fluxo baixa é compensada pelo incremento da frequência de operação do transformador.

5.2. Frequência de operação

A frequência de operação está no limite superior da faixa audível sendo escolhida em 20kHz para simplificar o processo de comutação

5.3. Densidade de corrente dos fios K_J (A/cm^2)

A densidade de corrente Kj nos fios em Ampères por metro quadrado pode ser calculada utilizando as expressões do quadro 1 sintetizadas em [7] a partir de [4]

EXPRESSÃO DE K_J PARA 20ºC≤ΔT≤60ºC - CONFORME O TIPO NUCLEO					
POTE	**EE**	**X**	**RM**	**EC**	**PQ**
$74{,}76 \cdot \Delta T^{0{,}54}$	$63{,}35 \cdot \Delta T^{0{,}54}$	$56{,}72 \cdot \Delta T^{0{,}54}$	$71{,}7 \cdot \Delta T^{0{,}54}$		

Quadro 1: Expressão de Kj de acordo com o tipo de núcleo [7]

. Este valor para o núcleo EE escolhido resulta em:

$$Kj = 63{,}35 \cdot \Delta T^{0{,}54} = 63{,}35 \cdot 30^{0{,}54} = 397 \frac{A}{cm^2} \quad (1)$$

5.4 Ciclo de trabalho ou *duty cycle* d

O ciclo de trabalho ou *duty cycle* d utilizado no cálculo do núcleo é o máximo e igual a 0,5. Este limite garante o tempo de desmagnetização do núcleo. Foi adotado para o projeto um ciclo de trabalho de 0,3 de forma a flexibilizar o ajuste de tensão do conversor onde:

$$d = \partial = \frac{t_f}{T} \tag{2}$$

Cujas variáveis no controle por largura de pulso ou PWM – *Pulse Width Modulation* são:
tf - tempo de interruptor ligado
T – período de operação

5.5. Fator de forma K_T

O fator de forma K_T é adimensional, calculado via expressão no controle PWM do quadro 2.

SENÓIDE	QUADRADA	PWM
4,44	4,0	$\frac{2}{d}$

Quadro 2: Valores de K_T de acordo com o tipo de forma de onda [7]

5.6. Fator de utilização da janela K_U

Este fator representa o percentual de utilização da janela pelo enrolamento dividido por 100. Adotou-se para K_U o valor de 0,45. Este fator poderá ser ajustado experimentalmente

5.7. Rendimento η

O rendimento considerado em geral é de 80% aa 85%, sendo que neste caso η, a razão entre a potência de entrada e de saída, varia respectivamente de 0,8 a 0,85. Foi adotado um rendimento típico de 0,8 para o conversor de potência.

5.8. Determinação do parâmetro x para o tipo de núcleo utilizado

O parâmetro x é definido a partir do núcleo, conforme o quadro 3 de [7] adaptado de [4]

VALOR DE x - CONFORME O TIPO NUCLEO					
POTE	**EE**	**X**	**RM**	**EC**	**PQ**
+0,17	**+0,12**	**+0,14**	**+0,13**		

Quadro 3: Expressão de Kj de acordo com o tipo de núcleo [7]

5.9. Cálculo do fator de influência Z para o tipo de núcleo utilizado

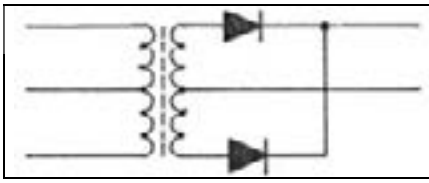
O fator de influência de [4] é calculado utilizando o valor de x e a expressão (3)

$$\mathbf{Z} = \frac{1}{1-\mathbf{x}} = \frac{1}{1-0{,}12} = 1{,}136 \tag{3}$$

O fator de influência corresponde a um expoente na equação do produto de áreas, que visa aproximar o projeto de suas condições reais.

5.10. Fatores de circulação de corrente primária e secundária:

Os fatores de Kp e Ks circulação de corrente, assumindo que a em cada primário e em cada secundário ocorre somente em um sentido, são vistos no quadro 4 de [7], adaptado de [4],

	$K_P = \sqrt{2}$	$K_S = \sqrt{2}$
	$S_P = \sqrt{2} \cdot \frac{Ps}{\eta}$	$S_S = \sqrt{2} \cdot Ps$

Quadro 4: Valores de Kp e Ks com corrente em único sentido no primário e secundário [7]

O transformador deverá ser sobre dimensionado porque circulará apenas a metade da corrente eficaz em seus enrolamentos, assumindo os fatores de circulação da expressão (4):

$$K_S = K_P = \sqrt{2} \equiv 1{,}41 \tag{4}$$

K_P fator de circulação de corrente primária
K_S fator de circulação de corrente secundária

5.11. Determinação da potência aparente de cada enrolamento

São definidas as potências úteis de saída P_S e de entrada P_E em W do conversor e a potência aparente S em VA do núcleo relacionadas através da expressão (5)

$$S = K_S \cdot P_S + K_P \cdot P_E \tag{5}$$

Utilizando o conceito de rendimento η e seu valor típico de 0,8 para conversores comutados, é possível relacionar a potência útil de entrada e saída resulta a expressão (6),

$$\boldsymbol{P_E = \frac{P_S}{\eta}} \tag{6}$$

Substituindo a expressão (6) em (5), resulta:

$$S = K_S \cdot P_S + K_P \cdot \frac{P_S}{\eta} \tag{7}$$

Finalmente a potência aparente do núcleo, é obtida a partir de uma Ps escolhida de 800W através da expressão (8) que é a expressão (7) simplificada

$$S = P_S \cdot \left(K_S \cdot + \frac{K_P}{\eta} \right) = 800\,W \cdot \left(1{,}41 \cdot + \frac{1{,}41}{0{,}8} \right) \cong 2545{,}56\,VA \tag{8}$$

5.12. Expressão para determinar o produto de áreas Ap_{cm}^4

O produto de áreas Ap do núcleo do transformador customizado corresponde ao produto entre a área efetiva da perna central Ae e a área da janela da expressão (9).

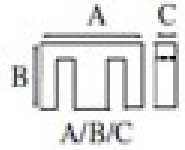
$$Ap = Ae \cdot Aj \tag{9}$$

Mediante a expressão (10) de [4], é possível determinar o produto de áreas a partir de variáveis pré-definidas:

$$Ap_{cm^4} = \left(\frac{S \cdot 10^4}{K_T \cdot f \cdot B_{MAX} \cdot K_\mu \cdot K_{J(A/cm^2)}} \right)^Z = \left(\frac{2.545{,}56 \cdot 10^4}{6{,}66 \cdot 20.000 \cdot 0{,}3 \cdot 0{,}45 \cdot 397} \right)^{1{,}136} = 57{,}91\, cm^4 \tag{10}$$

Ap_{cm^4} Produto de áreas [cm^4]
S Potência aparente [VA]
B_{MAX} Densidade de fluxo máxima [T]
K_T Fator de forma igual a 2/d [adimensional]
K_μ Fator de utilização da janela igual a 0,45 [adimensional]
$K_{J\ (A/cm^2)}$ Densidade de corrente dos fios de 397[A/cm^2]
Z Fator de influência do núcleo 1,136 [adimensional]

De posse do Ap calculado são determinadas as dimensões do núcleo do transformador não disponível comercialmente [8], Adotando-se a área da janela Aj de 5,32cm^2 de um núcleo comercia de potência E65/33/52 de acordo com o quadro 5 de [7] adaptado de [4], foi possível calcular a área efetiva da coluna central do núcleo customizado.

	**MEDIDA**	**Ap (cm^4)**	**Ae (cm^2)**	**ℓe (cm)**
	65/33/26	29,1	5,32	14,7

Quadro 5: Dados de fabricante de núcleo de ferrita [7]

Este raciocínio levou em conta que ao invés de se customizar o núcleo, também seria possível associar estes núcleos comerciais de maiores dimensões em paralelo. Assim analisando o resultado da área efetiva da perna central, de acordo com a expressão (11), o núcleo customizado resultaria o mesmo que dois núcleos comerciais em paralelo:

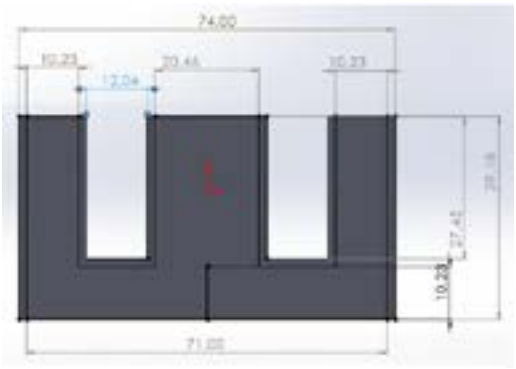
$$Ae = \frac{Ap}{Aj} = \frac{57{,}91\, cm^4}{5{,}32\, cm^2} = 10{,}744\, cm^2 \tag{11}$$

Assim a forma para o núcleo customizado pode ser projetada com o mesmo caminho médio do núcleo E65/33/26 e com sua área da seção transversal praticamente dobrada.

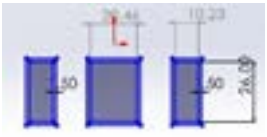
6. CUSTOMIZAÇÃO E PROJETO CAD DA FORMA DO NÚCLEO

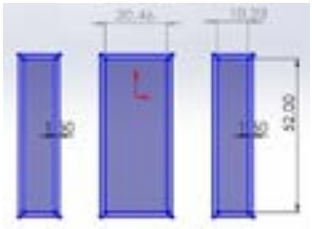
A figura 4 apresenta uma vista da forma do núcleo customizado em CAD, com as dimensões ajustadas para o projeto CAD da forma do núcleo do indutor utilizando o software *SolidWorks.* Um dos fatores limitantes é a espessura mínima *e* de 1,5mm obtida na impressão das paredes. Os 65mm foram acrescidos de 9mm tendo em vista a existência de seis paredes verticais na forma, totalizando 74mm. A profundidade p do núcleo comercial é de 26mm . Os

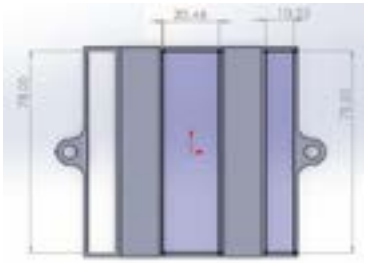
núcleos customizados tem profundidades de 52 e 78 e equivaleriam a colocar em paralelo dois e três núcleos originais respectivamente. A profundidade p de todos projetos sofreu um acréscimo de 3mm, tendo em vista as duas paredes laterais resultando 29mm na forma do núcleo original e 55mm e 81mm nas customizadas.



(a)vista lateral comum a todos núcleos







(b) corte E65/33/26 (c) corte E65/33/52 (d) corte E65/33/78

Figura 4: Medidas do projeto CAD das forma dos núcleo E original e customizados

Ajustando uma área efetiva *Ae* de 5,32cm^2 ou 532mm^2 segundo dado do fabricante apresentado no quadro 5, foi possível calcular a largura da coluna central usando (12)

$$lc = \frac{Ae}{p} = \frac{532\ mm^2}{26\ mm} \cong 20,46\ mm \tag{12}$$

Visando manter a mesma densidade de fluxo no transformador a largura l_L das colunas laterais resultou 4,3mm ou seja, a metade daquela calculada para a coluna central.
A dimensão horizontal original da janela *hj* pode ser calculada usando a expressão (13)

$$hj = \frac{A - 2 \cdot lc}{2} = \frac{65\ mm - (2 \cdot 20,46\ mm)}{2} = 12,04\ mm \tag{13}$$

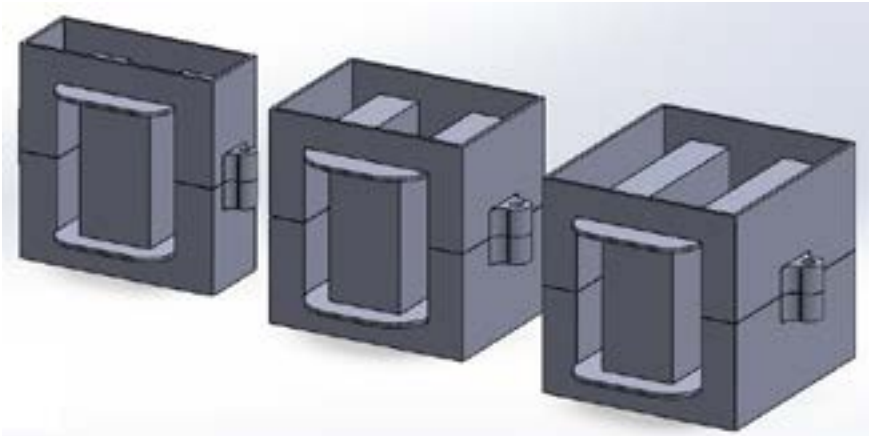
O produto de áreas dado na expressão (9) para o núcleo E63/33/26 é de 29,1cm^4 de acordo com o quadro 5. Então é possível calcular a área total da janela usando a expressão (14) obtida de (9):

$$Aj = \frac{Ap}{Ae} = \frac{29,1cm^4}{5,32\ cm^2} \cong 5,47\ cm^2 \tag{14}$$

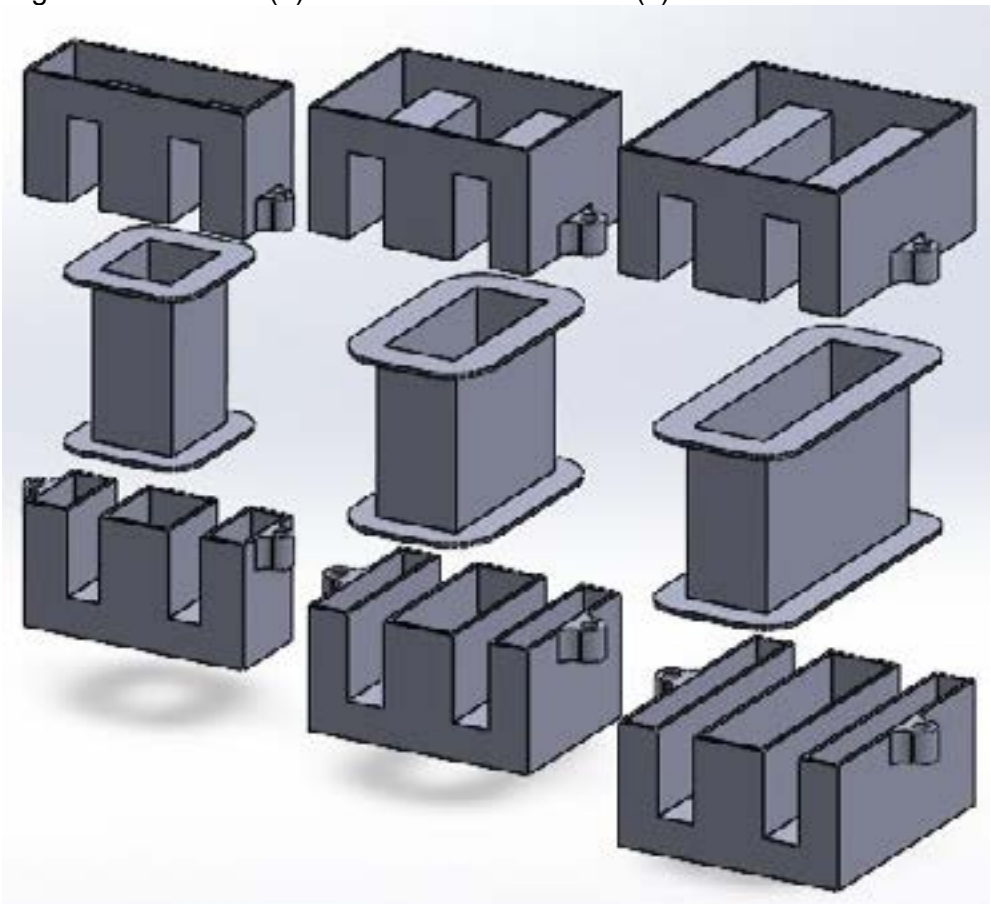
Considerando uma área de janela um núcleo EE de 5,47cm^2 é importante lembrar que o carretel ocupa uma dimensão e na horizontal e na vertical. Assim a dimensão vertical da janela *vj* é calculada usando a expressão (10) para um único E.

$$vj = \frac{Aj\ /\ 2}{hj - e} + e = \frac{273\ mm^2}{12,04 - 1,5} + 1,5 \cong 27,45\ mm \tag{10}$$

A figura 5(a) apresenta uma vista tridimensional da forma de um núcleo E65/33/26 e duas vistas customizadas, E65/33/52 na figura 5(b) e E65/33/78 na figura 5(c).



(a)original E65/33/26 (b) E65/33/52 customizado (c) E65/33/78 customizado



(e)E65/33/26 explodido (f)E65/33/52 explodido (g) E65/33/78 explodido

Figura 5: Projeto CAD tridimensional das formas do núcleo E

7. IMPRESSÂO 3D DA FORMA

Com o auxílio de uma impressora 3D e com o projeto CAD, foi possível imprimir a forma com o objetivo de customizar o núcleo de ferrita de potência vista na figura 6 ,

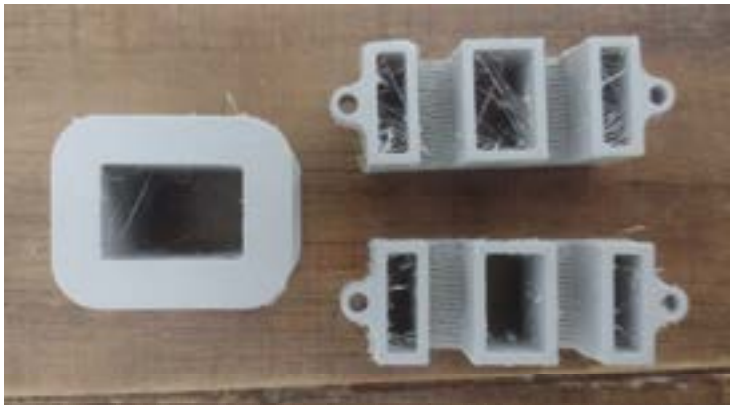


Figura 6: Forma implementada com o uso da impressora 3D

8. RECICLAGEM DA FERRITA E COMPACTAÇÃO DO NÚCLEO

Visando a reciclagem, a ideia é seguir o projeto utilizando pedaços de ferrita disponíveis na forma de sucata moídos com uma textura de pó, e a utilização de um catalisador e resina utilizados para aglutinação do material. A vantagem da forma desenvolvida é de permitir testar diferentes composições, visando a reciclagem. Testes em bancada permitirão avaliar parâmetros elétricos e magnéticos e adequar o fator de ocupação.

CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentada uma revisão dos principais conversores CC-CC comutados, isolados. O objetivo é identificar variáveis importantes no projeto de um transformador destinado a um conversor intermediário de potência. A função do transformador em circuitos intermediários de potência de veículos elétricos, pode contribuir para a utilização de menores tensões de baterias ou então para adaptar a tensão de diferentes tipos de baterias com o barramento CC do circuito de potência de acionamento. Em geral as potências utilizadas nesta conversão dependem do motor utilizado não sendo portanto pequenas. Neste caso os núcleos de ferrita necessários para a construção destes transformadores na maioria das vezes não são disponíveis comercialmente. Este trabalho apresentou como alternativa o projeto assistido por computador ou CAD – *Computer Aided Design* de uma forma customizada destinada a construção de núcleos de transformadores necessários a esta conversão intermediária utilizando ferritas recicladas. A impressão 3D permitiu implementar a forma projetada, sendo a tarefa favorecida pelas maiores dimensões destes núcleos destinados a uma potência elevada. De posse da forma impressa, pretende-se efetuar no futuro a compactação do núcleo utilizando pó de ferrita reciclado e um aglutinante de base isolante com vistas a reduzir perdas parasitas. Testes elétricos preliminares permitirão obter parâmetros elétricos e também inferir parâmetros magnéticos utilizáveis no projeto, Assim, cálculos iterativos e implementação de indutores poderão sugerir um novo fator de ocupação para este projeto.

AGRADECIMENTO

O grupo agradece o apoio dos organizadores do RENOMAT e em especial ao Prof. Lírio Schaeffer, pelo incentivo às iniciativas.

Referências

[1] CANALLI V.M., Projeto de Veículos Urbanos Viáveis, ECPCVC, 2025

[2] DE AZEREDO, N.L. Estudo e Implementação de Laço Óptico para Controle da Tensão do Barramento Intermediário de um Conversor Comercial Indireto de Frequência, Trabalho de Conclusão de Curso PUCRS, 2023.

[3] CANALLI V.M., Apostila de Conversores CC-CC, ECPCVC, 2025

[4] MELLO L.F.P., Projeto de Fontes Chaveadas, Editora Érica, 1987

[5] MELLO L.F.P., Análise e Projeto de Fontes Chaveadas, Editora Érica, 1996

[6] MELLO L.F.P., Projeto de Fontes Chaveadas, Editora Érica, 2011

[7] CANALLI V.M., Apostila de Projeto de Transformadores, ECPC-VC, 2025

[8] THORNTON ELETRÔNICA, Catálogo de Ferrites, 2025

[9] HARTMANN L. Análise, Implementação e Aplicação de Núcleo de Ferrita Reciclado em Circuito Conversor CC-CC Elevador, Orientador Prof. Dr Vicente Mariano Canalli - Trabalho de Conclusão, PUCRS, 2017/1

[10] DA SILVA R.G. – Núcleos toroidais – Faça-os você mesmo, Eletrônica Popular, Abril 1962

44º SENAFOR

28th International Forging Conference
13th International Sheet Metal Forming Conference / 10th BrDDRG Congress
13th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies – Brazil/RS
2nd International Conference on Innovation in Materials and Manufacturing
Hotel Plaza São Rafael – P. Alegre RS, October 1-3, 2025

PROJETO ASSISTIDO POR COMPUTADOR ORIENTADO À ASSOCIAÇÃO MISTA DE MÓDULO DE CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL DIRETAS A BIOETANOL

Eduardo Duarte Cabral - Autor [1]
Jorge Pimentel de Morais - Autor [2]
Lucas Melo Machado - Autor [3]
Marçal Rodrigues Pires - Orientador [4]
Vicente Mariano Canalli - Orientador [5]

RESUMO

Este artigo inicia contextualizando a importância do bioetanol no cenário brasileiro. Além do seu emprego em veículos a combustão existem perspectivas de sua aplicação na geração de energia destinada a dispositivos alimentados a eletricidade. Neste caso torna-se importante destacar o princípio de operação das células de combustível diretas a bioetanol. São apresentadas as topologias construtivas de uma célula de combustível direta a bioetanol típica. A partir do levantamento bibliográfico da associação foi elaborado o projeto *CAD - Computer Aided Design* de uma célula e seus elementos. A partir da topologia básica da célula, é possível definir como associar as mesmas de forma mista, com o objetivo de incrementar os níveis de tensão ou de corrente e assim a potência total obtida pelo dispositivo resultante.

. .

Palavras Chave — Células de combustível, Bioetanol, Módulo, Projeto assistido

[1] Electrical Engineering Student; Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul, Brazil
[2] Mechanical Engineer, CNPq - Energy and Gas Application Group, Brazil
[3] Electrical Engineer, Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul, Brazil
[4] Prof. Dr. Eng. Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul, Brazil.
[5] Prof. Dr. Eng. SSRC-VC – Space for Science, Research and Culture V. Canali, Brazil.

Buscando otimizar o conjunto, as células são replicadas e novos componentes são projetados e adicionados para permitir uma integração harmoniosa de associações em série e paralelo destas células diretas. Fatores importantes como a forma de ministrar o combustível e a circulação de ar no conjunto são fundamentais para a definição dos componentes projetados especificamente para cada tipo de associação.

COMPUTER-AIDED DESIGN FOR MIXED-USE COMBINATION OF A DIRECT BIOETHANOL FUEL CELL MODULE

Eduardo Duarte Cabral - Author [1]
Jorge Pimentel de Morais - Author [2]
Lucas Melo Machado - Author [3]
Marçal Rodrigues Pires - Adviser [4]
Vicente Mariano Canalli - Adviser [5]

ABSTRACT

This article begins by contextualizing the importance of bioethanol in the Brazilian market. In addition to its use in combustion vehicles, there are prospects for its application in power generation for electrically powered devices. In this case, it is important to highlight the operating principle of direct bioethanol fuel cells. The construction topologies of a typical direct ethanol fuel cell are investigated. Based on the literature review of the association, a CAD (Computer Aided Design) design of a cell and its elements was developed. Based on the cell's basic topology, it is possible to define how to combine them in a mixed fashion, with the aim of increasing voltage or current levels and, thus, the total power obtained by the resulting device. Seeking to optimize the assembly, the cells are replicated, and new components are designed and added to allow for the harmonious integration of series and parallel combinations of these direct cells. Important factors such as fuel delivery and air circulation within the assembly are fundamental to defining the components specifically designed for each type of combination..

1. INTRODUÇÃO

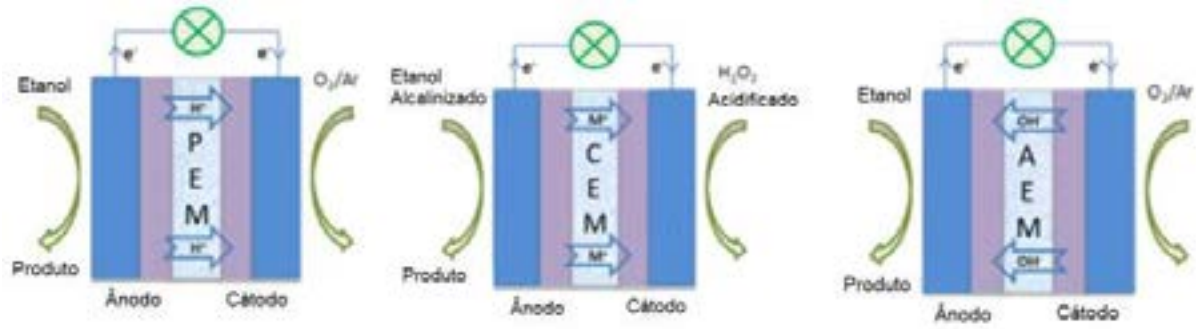
De acordo com [1], a utilização bioetanol combustível traz uma série de benefícios do ponto de vista ambiental. Por ser derivado de fontes vegetais, sendo considerado um biocombustível e uma fonte de energia renovável. O bioetanol tem uma maior densidade energética que o hidrogênio. É considerado um combustível mais seguro e no Brasil, tem potencial para eliminar os custos da infraestrutura de hidrogénio

Torna-se importante ressaltar a decisão tomada pelo governo brasileiro, há cinquenta anos atrás, por ocasião da crise do petróleo, visando mitigar a dependência brasileira através do Programa Nacional do Álcool – Pró Álcool, criado em 14 de novembro de 1975 pelo Decreto 76.593 [2]. O Brasil conta hoje com uma agricultura altamente mecanizada, atingindo grande produtividade. Um indicador qualitativo diz respeito à modelos de caminhões desenvolvidos especificamente para o trabalho de campo

O Programa cumpriu cinco fases, cuja Fase Inicial se deu no período de 1975 a 1979. De 1980 a 1986 se deu a Fase da Afirmação, seguida pela Fase da Estagnação, de 1986 a 1995. A Fase da Redefinição aconteceu de 1995 ao ano 2000. Na fase atual, o bioetanol é uma *commodity* mundialmente negociada, com a mais variadas aplicações, deixando o Brasil em uma condição privilegiada, em especial pela nova realidade imposta pela transição energética Contextualizando, um dos maiores fabricantes de veículos do mundo, que pesquisa o hidrogênio como fonte de energia, após dez anos de implantação de um modelo que nasceu para funcionar com o hidrogênio, enfrentou o obstáculo da logística do reabastecimento, pela ausência de uma rede implantada. o Brasil em uma condição privilegiada, em especial pela nova realidade imposta pela transição energética, e com a tecnologia do referido veículo em fase de adaptação, eliminando o cilindro de hidrogênio, para utilizar os tradicionais reservatórios de combustíveis líquidos. Maiores detalhes sobre os sistemas adotados ainda não estão disponíveis, porém o fato da solução estar no etanol, já é o suficiente para colocar o Brasil no centro de uma cadeia energética invejável, tendo em vista ainda as outras formas de obtenção de etanol existentes. Além do uso veicular, a tecnologia de utilização do bioetanol como fonte de energia, através da obtenção de hidrogênio, é também a solução de outro grande gargalo energético, permitindo a implantação da *geração distribuída*. tendo em vista mitigar os eventos extremos que estão impactando nas redes de distribuição de energia elétrica, produzindo os conhecidos *apagões.* Associado ao hidrogênio gerado a partir da energia solar, poderá abastecer residências, comércios e indústrias, em regime *off-grid*, ou seja, independente das redes tradicionais. A importância deste cenário é tal, que o Brasil pode ter um elemento estratégico para enfrentar as grandes transformações em andamento.

2. PRINCÍPIO E COMPONENTES DA CÉLULA DE COMBUSTÍVEL DIRETA A BIOETANOL

As principais células a combustível diretas a bioetanol utilizam três tipos de membranas: A membrana de intercâmbio de prótons PEM – *Proton Exchange Membrane*, vista na figura 1(a), permite o transporte do átomo de hidrogênio na forma de próton caracterizado pelo íon hidrogênio H+.



(a)PEM (b)CEM (c) AEM

Figura 1: Diagramas esquemáticos de células de combustível diretas a etanol [3]

A membrana de troca catiônica CEM – *Cationic Exchange Membrane,* vista na figura 1(b) é caracterizada pela presença de cargas negativas fixas. Assim, é capaz de permitir que íons positivos (contra íons) se movam através dele, bloqueando ânions (coíons).

A membrana de troca aniônica AEM - *Anionic Exchange Membrane,* vista na figura 1(c) opera em meio alcalino, bloqueia cátions permitindo o transporte de ânions. O íon poliatômico OH, é conhecido como hidróxido. É possível observar que o hidróxido tem carga -1, o que significa

que é um ânion, contendo um elétron a mais, que o núcleo de um átomo de hidrogênio mais um átomo de oxigênio.

3. ESTUDO DA CONSTRUÇÃO DE CÉLULA DE COMBUSTÍVEL DIRETA A BIOETANOL

Como ilustrado na figura 1, os principais componentes de uma célula de combustível direta a etanol, são o cátodo, ânodo e membrana. Na figura 2(a) é vista uma célula de combustível direta a etanol com uma membrana de intercâmbio de prótons.

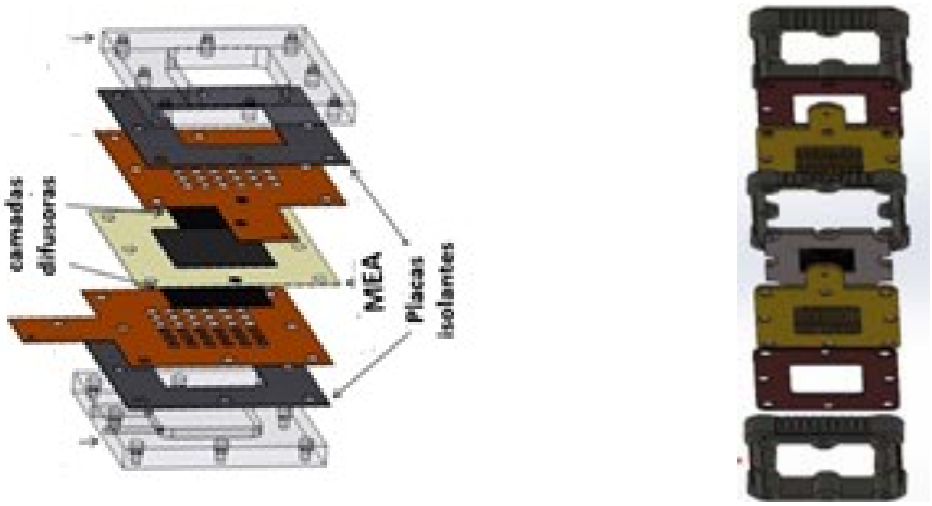
(a)Célula comercial direta [4] (b)Topologia dual [5]

Figura 2: Células de combustível diretas a bioetanol

Construtivamente as células são similares, necessitando de uma admissão para o bioetanol e de outra para o ar ou oxigênio. A topologia dual de célula vista na figura 2(b) foi concebida para incrementar praticidade na admissão do etanol e do ar ou oxigênio.

4. PROJETO CAD DE CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL DUAL DIRETA A BIOETANOL

A partir do levantamento bibliográfico construtivo de uma célula a bioetanol direta visto na figura 3(a), foi elaborado o projeto *CAD - Computer Aided Design* de uma célula dual e seus elementos ilustrado na figura 3(b).

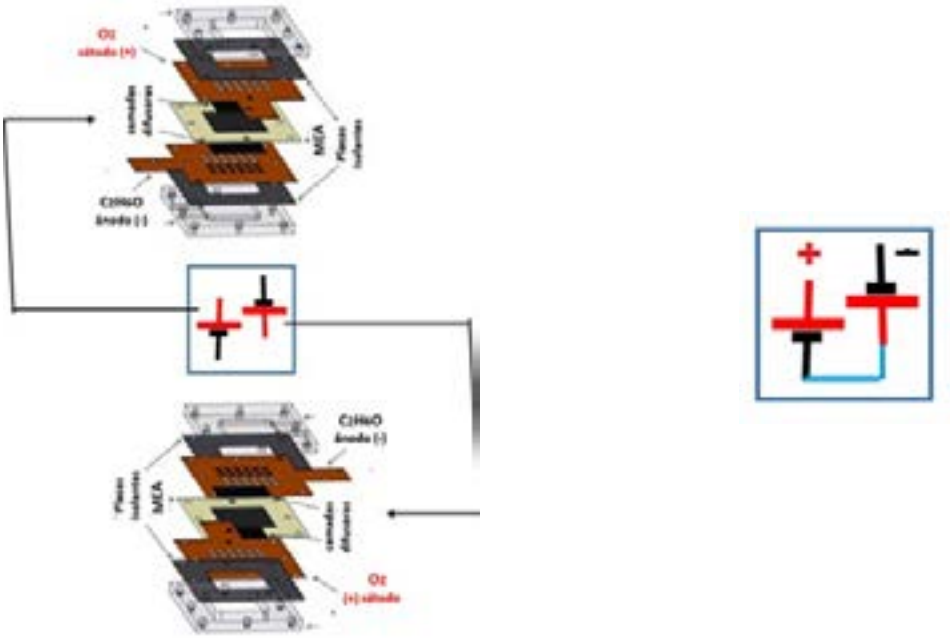


(a)célula comercial direta típica [6] (b) Projeto CAD célula dual

Figura 3: Células a bioetanol e seus componentes

5. SOMA DE TENSÕES NA CÉLULA DE COMBUSTÍVEL DUAL DIRETA A ETANOL

A célula dual é caracterizada pela presença de dois cátodos e de dois ânodos na forma de duas fontes de tensão como ilustra a figura 4.



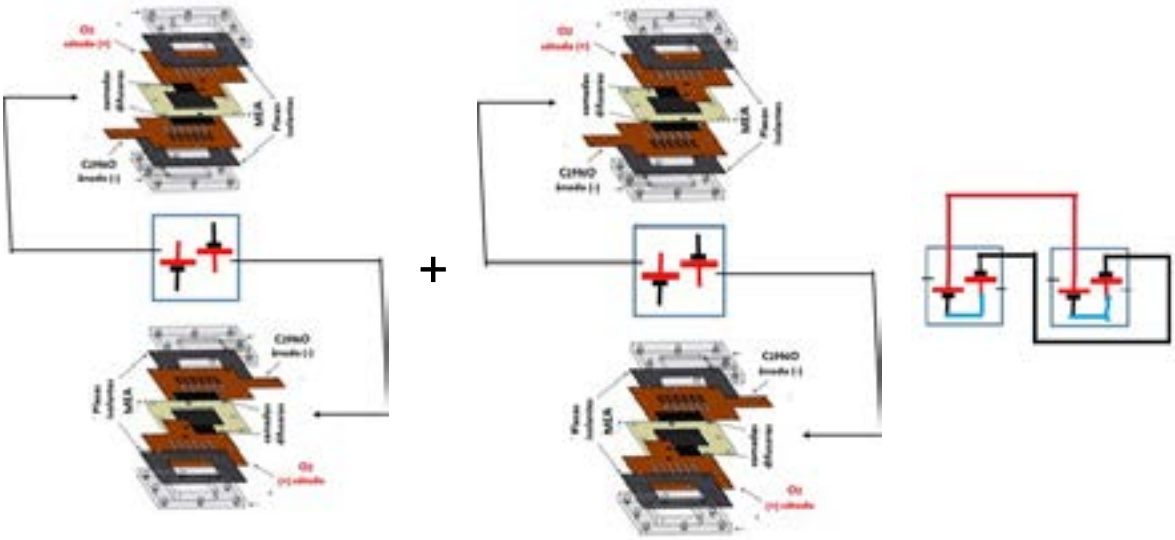
(a)Células obtidas - Adaptado de [5] e [6] (b)associação

Figura 4: Análise da configuração dual

Desta forma nesta configuração é permitindo um incremento de tensão, desde que as duas células diretas sejam associadas em série através de um condutor como ilustra a figura 4(b).

6. ASSOCIAÇÃO DE DUAS CÉLULAS DUAIS EM PARALELO

Duas células duais, compostas por células em série da figura 4(a) são replicadas na figura 5(a), possibilitando uma associação discreta em paralelo como ilustra a figura 5(b).

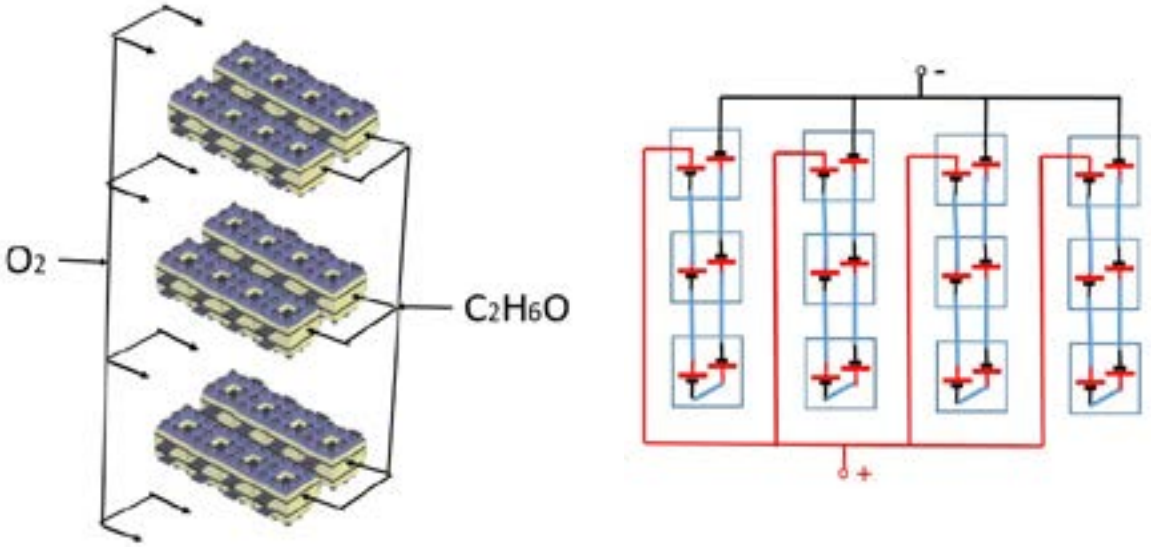


(a) células duais em série replicadas em paralelo - Adaptado de [5] e [6] (b)diagrama

Figura 5: Anteprojeto com duas célula duais replicadas em paralelo

7. ANTEPROJETO DE ASSOCIAÇÃO DE CÉLULAS DUAIS DIRETAS A BIOETANOL

Utilizando-se um coletores similares ao utilizado para o metanol em [7] para as admissões do oxigênio O_2 ou ar e do bioetanol C_2H_6O, as células duais podem ser agrupadas na forma do anteprojeto simplificado 3S/4P com três células duais em série e quatro em paralelo da figura 6(a).



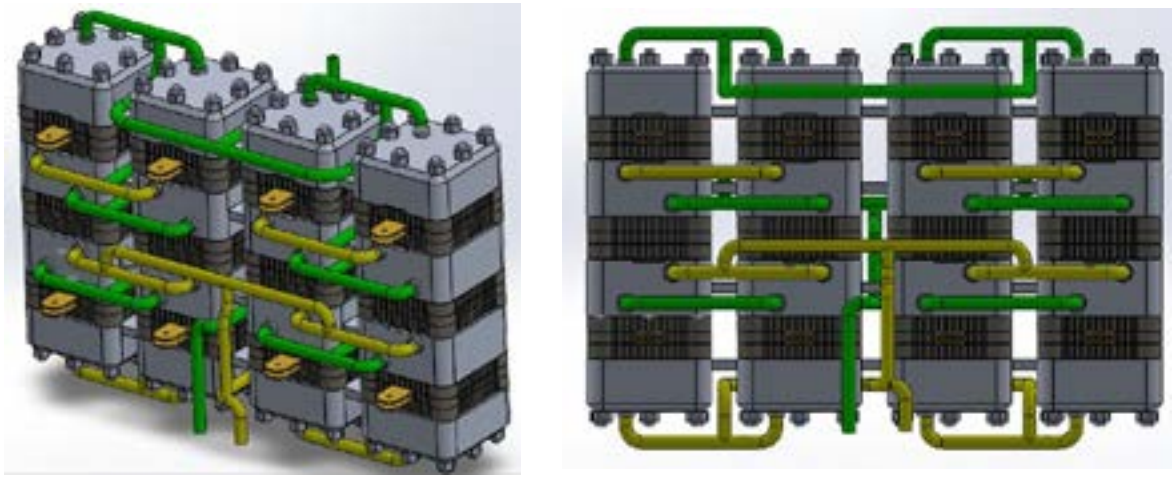
(a)distribuição espacial - Adaptado de [5] (b)associação mista

Figura 6: Anteprojeto de um módulo 3S/4P de células a combustível diretas a bioetanol

Então através de associações mistas em série ou paralelo, na forma da figura 6(b), poderá ser constituído um módulo para incrementar a potência. O incremento de tensão se dá na associação série enquanto o incremento de corrente é via associação paralela. Neste caso potência é representada pelo produto da tensão pela corrente.

8. PROJETO CAD DE ASSOCIAÇÃO 3S/4P DE CÉLULAS DIRETAS A BIOETANOL

Em uma associação típica de células a bioetanol diretas como no projeto CAD da figura 7, cada célula utilizaria uma tubulação independente para alimentação do oxigênio ou ar e do bioetanol. Assim o sistema de alimentação seria mais complexo



(a)Vista frontal (b)Vista posterior

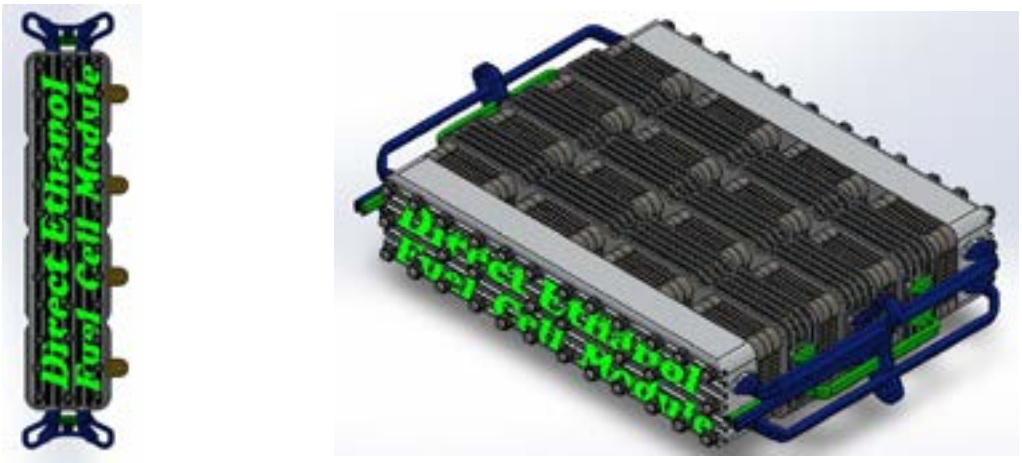
Figura 7: Versão CAD de associação 3S4P típica de células a *bioetanol* diretas

9. PROJETO CAD DE MÓDULO 4S/4P DE CÉLULAS DUAIS DIRETAS A BIOETANOL

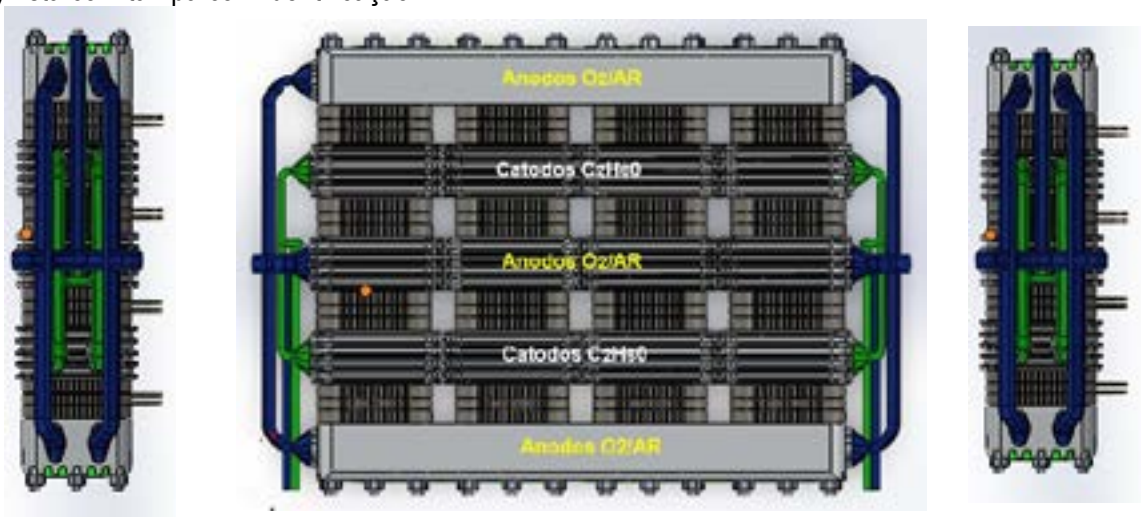
No projeto CAD de um módulo, as tubulações podem ser substituídas por tanques coletores do tipo visto na figura 8, que adaptados à células duais, substituem os tubos coletores proporcionando uma integração simplificada das células duais.

Figura 8: Peça em CAD de integração dos tanques de etanol e circulação de ar

Conforme a figura 9 componentes como o coletor de admissão são projetados e adicionados permitindo a concepção de um módulo gerador de energia a etanol direto com associação mista de quatro células em série e quatro caminhos para a corrente.



(a)Vista com tampa com identificação



(b)vista lateral e coletores

Figura 9: Representação CAD do módulo 4S4P de células diretas a etanol

CONCLUSÃO

O bioetanol combustível traz uma série de benefícios do ponto de vista ambiental. Por ser derivado de fontes vegetais, sendo considerado um biocombustível e uma fonte de energia renovável. O etanol tem uma maior densidade energética que o hidrogênio. É considerado um

combustível mais seguro e no Brasil, tem potencial para eliminar os custos da infraestrutura de hidrogénio.
O hidrogênio, enfrenta o obstáculo da logística e segurança de reabastecimento, pela ausência de uma rede implantada. Neste contexto, o Brasil se encontra em uma condição privilegiada, em especial pela nova realidade imposta pela transição energética. O uso do bioetanol elimina o cilindro de hidrogênio, permitindo utilizar os tradicionais reservatórios de combustíveis líquidos. Além do seu emprego em veículos a combustão existem perspectivas de aplicação do etanol na geração de energia destinada a dispositivos alimentados a eletricidade. Neste caso torna-se importante destacar o princípio de operação das células de combustível diretas a etanol, que geram eletricidade a partir de diluições de etanol líquido. Neste trabalho, considerados os recursos disponíveis para pesquisa, buscou-se contribuir com um projeto CAD concebido com base na literatura. Voltado a aplicabilidade da tecnologia de células de combustível diretas a etanol na forma de módulos, é proposto um projeto que utiliza células duais associadas a coletores de etanol e ar. Foi proposta e projetada uma associações mista com dezesseis células duais de forma a ilustrar como pode ser realizado o ajuste da tensão, corrente e potência do módulo proposto. A intenção deste trabalho foi de contribuir com a evolução da tecnologia na forma de projeto e de tentar sensibilizar investidores para o aporte de recursos nesta tecnologia.

AGRADECIMENTO

O grupo agradece o apoio dos organizadores do RENOMAT e em especial ao Prof. Lírio Schaeffer, pelo incentivo às iniciativas.

Referências

[1] ENERGIFORSK, Direct Ethanol Fuel Cells: Ethanol for our future fuel cells?, Rapport 2015:137

[2] (2024) SITE CÂMARA DOS DEPUTADOS - http://www2.camara.leg.br/

[3] AN L., ZHAO T.S., LY Y.S., Carbon-neutral sustainable energy technology: Direct Ethanol Fuel Cells, Renewable and Susteinable Energy – Elsevier, 2015

[4] HORIZON FUEL CELL TECHNOLOGY - Ethanol Fuel Cell Science Kit Assembly Guide

[5] EKDHARMASUIT P., Performance and Ethanol Crossover of Passive Direct Ethanol Fuel Cell Stack, E3S Web of Conferences 141, 01008 (2020), RI²C 2019

[6] OLIVEIRA V.B, PINTO A.F.R., DE SÁ M.H., Passive Small Direct Alchool Fuel Cellls for Low-Power Portable Applications: ASSESSMENT BASED ON Innovative Increments Since 2018, ENERGIES MDPI, 2022

[7] FRONTIS ENERGY - Improving Direct Ethanol fuel cells by fluorine doping – https://frontisenergy.com/2022/01/30/improving-direct-ethanol-fuel-cells-by-fluorine-doping/ - acessado em 16 de março de
2024

44º SENAFOR

28th International Forging Conference
13th International Sheet Metal Forming Conference / 10th BrDDRG Congress
13th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies – Brazil/RS
2nd International Conference on Innovation in Materials and Manufacturing
Hotel Plaza São Rafael – P. Alegre RS, October 1-3, 2025

PROJETO, ROTEAMENTO E INSTALAÇÃO DE ACESSÓRIOS E DISPOSITIVOS DE ILUMINAÇÃO E SINALIZAÇÃO PONTUAL EFICIENTE EM PROTÓTIPO DE TRICICLETA ELÉTRICA

Eduardo Duarte Cabral - Autor [1]
Jorge Pimentel de Morais - Autor [2]
Lucas Melo Machado - Autor [3]
Marçal Rodrigues Pires - Orientador [4]
Vicente Mariano Canalli - Orientador [5]

RESUMO

O projeto de uma *tricicleta* elétrica iniciou na PUCRS e segue sendo desenvolvido no ECPC-VC - Espaço de Ciência Pesquisa e Cultura - Vicente Canali. Este artigo aborda um tema pouco frequente na literatura que é a instalação elétrica veicular deste protótipo, utilizando-se um *software* para representar o projeto. A circulação segura e eficiente de veículos elétricos simples, é beneficiada pela utilização de acessórios elétricos e de circuitos de iluminação e sinalização. Os *LEDs – Light Emmiter Diodes,* têm contribuído para reduzir os custos dos protótipos, e o consumo de energia.

Palavras Chave — Veículo Elétrico, Tricicleta, Sinalização pontual, Iluminação, Acessórios

[1] Electrical Engineering Student; Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul, Brazil
[2] Mechanical Engineer, CNPq Energy and Gas Application Group, Brazil
[3] Electrical Engineer, Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul, Brazil
[4] Prof. Dr. Eng. Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul, Brazil.
[5] Prof. Dr. Eng. SSRC-VC – Space for Science, Research and Culture V. Canali, Brazil.

Neste trabalho é introduzido o conceito de *SP - Sinalização Pontual*, descrevendo-se as suas principais vantagens. Ainda, uma buzina *piezoelétrica*, e o uso de LEDs contribuem com menores níveis de corrente, responsáveis por uma importante redução na seção dos condutores da instalação, simplificando os circuitos de proteção e de comando. A bateria auxiliar proposta utiliza uma tensão de 3,0V compatível com a utilização direta e eficiente de LEDS. Por fim o diagrama de iluminação e sinalização proposto é implementado em bancada e no protótipo da *tricicleta*

DESIGN, ROUTING AND INSTALLATION OF ACCESSORIES AND DEVICES OF EFFICIENT SPOT LIGHTING AND SIGNALING IN ELECTRIC TRICYCLET PROTOTYPE

Eduardo Duarte Cabral - Author [1]
Jorge Pimentel de Morais - Author [2]
Lucas Melo Machado - Author [3]
Marçal Rodrigues Pires - Adviser [4]
Vicente Mariano Canalli - Adviser [5]

ABSTRACT

The electric tricycle project began at PUCRS and continues to be developed at ECPC-VC - Espaço de Ciência Pesquisa e Cultura - Vicente Canali. This article addresses a topic rarely found in the literature: the vehicle electrical installation of this prototype, using software to represent the project. The safe and efficient operation of simple electric vehicles is benefited by the use of electrical accessories and lighting and signaling circuits. LEDs (Light Emitter Diodes) have contributed to reducing prototype costs and energy consumption. This paper introduces the concept of SP (Point Signaling), describing its main advantages. Furthermore, a piezoelectric horn and the use of LEDs contribute to lower current levels, responsible for a significant reduction in the installation's conductor cross-section, simplifying the protection and control circuits. The proposed auxiliary battery uses a voltage of 3.0 V, compatible with the direct and efficient use of LEDs. Finally, the proposed lighting and signaling diagram is implemented on the bench and in the tricycle prototype.

1. INTRODUÇÃO

Embora o desenvolvimento tecnológico atual seja enorme, muitos usuários, especialmente os de baixo poder econômico, se ressentem de arquiteturas simples e econômicas, que visam o essencial de uma aplicação. No caso dos veículos elétricos isso se traduz na possibilidade de deslocamento, desvinculando a tradicional dependência tecnológica e dificuldade de manutenção, que onera e por vezes inviabiliza o uso final. A *tricicleta* elétrica, é um veículo simples, bem mais barato do que um triciclo [1], que pode auxiliar na entrega de cargas leves e na mobilidade urbana sustentável. Especialmente em regiões planas como o litoral, os níveis de irradiação solar, ventos e o movimento das ondas, tornam a aplicação deste veículo elétrico, compatível com as energias renováveis.

2. CONCEITO E VANTAGENS DA SINALIZAÇÃO PONTUAL E PIEZOLETRICIDADE

Na *tricicleta* elétrica desenvolvida no projeto de iniciação científica intitulado Veículos Elétricos Urbanos Viáveis [2] proposto em 2021, não foi instalado um pedal assistido no veículo. A iluminação eficiente LED implementada, vista na figura 1, utilizou soquetes de lâmpadas piloto automotivas, alimentadas por uma bateria com tensão de 12V

(a) dianteira (b) traseira

Figura 1: Dispositivos de sinalização no projeto da PUCRS

No trabalho descrito neste artigo, incluiu-se c conceito de SP - Sinalização Pontual, que consiste na utilização direta de *LEDs – Light Emmiter Diodes* unitários na iluminação e sinalização do veículo.

Para se ter ideia, o custo de todos sinalizadores luminosos pontuais utilizados nesta proposta, foi da ordem de apenas um soquete de lâmpada piloto automotivo visto na Figura 2, que compunha outros sete utilizados na régua traseira da figura 1(b), no projeto de origem.

(a) lâmpada piloto comercial

MARCA	DSC
PRODUTO	LANTERNA PILOTO
COR	AMBAR
CÓDIGO	1151

(b) referência do produto

Figura 2: Um dos sete soquetes na régua de sinalização traseira no projeto da PUCRS

Também foi realizada a adaptação elétrica e mecânica de um pedal assistido no protótipo.
A utilização conjunta com um transdutor sonoro piezoelétrico permitiu a operação com da instalação com tensões baixas e um consumo irrisório de energia, incrementando em muito a eficiência e diminuindo a seção dos condutores na instalação.
O conceito de Sinalização Pontual empregando LEDs especiais dispensou a adaptação de um relé de pisca para LEDs como o da figura 3, disponível comercialmente para motocicletas

MARCA	SMARTBULL
PRODUTO	RELÉ DE PISCA 3 PINOS 12 V
MODELO	UNIVERSAL
CÓDIGO	37300-080-TD01

(a) modelo para uso com LEDs (b) referência do produto

Figura 3: Relé universal de pisca-pisca de três pinos para motocicletas com LED

3. ANTE PROJETO DO CIRCUITO DE ILUMINAÇÃO E SINALIZAÇÃO

O ante projeto da instalação, desenvolvido no ECPC-VC, é ilustrado na figura 4

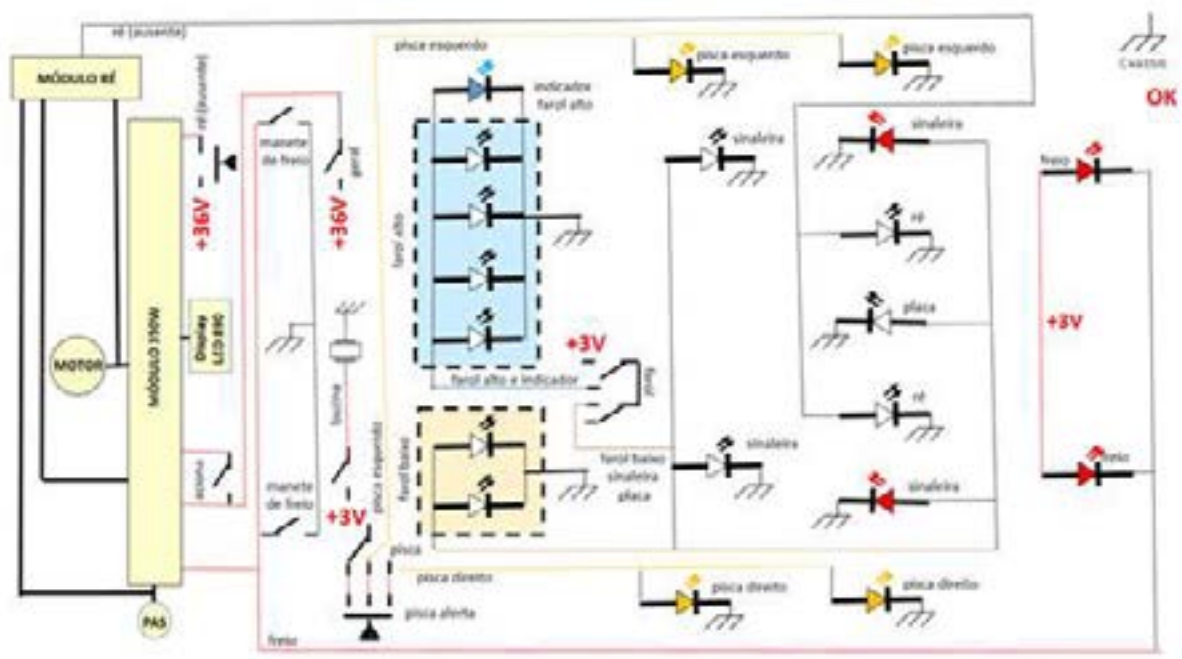
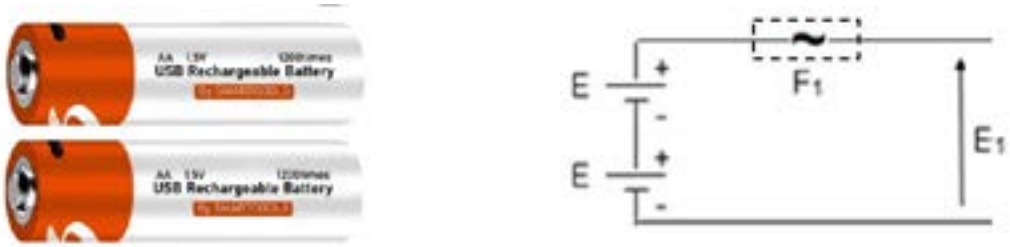


Figura 4: Ante projeto da instalação com LEDs

4. BATERIA AUXILIAR E FUSÍVEL UTILIZADO NA ALIMENTAÇÃO DA BANCADA

Para efeito de reduzir custos da instalação, foi utilizado um suporte plástico para associação de duas pilhas AA recarregáveis de Litio de 1,5V vistas na figura 5(a) em série, totalizando tensão de operação de 3,0V. Um suporte e fusível são utilizados para proteger a instalação contra curto-circuito. O diagrama simplificado da associação é ilustrado na figura 5(b).



(a) pilhas recarregáveis de Litio de 1,5V (b) diagrama elétrico

Figura 5: Bateria auxiliar de 3,0V com fusível

5. BANCADA DIDÁTICA PARA ILUSTRAÇÃO E TESTE DO CIRCUITO DA INSTALAÇÃO

A bancada didática da figura 6 permitiu ilustrar os dispositivos envolvidos na instalação e incluiu, farol alto e baixo, indicador de luz alta, interruptores, réguas de LEDs dianteira e traseira e um transdutor piezoelétrico que opera com 3,0V que serve de buzina.

Figura 6: Bancada didática ilustrativa com dispositivos de sinalização e iluminação

Na figura 7 são ilustradas função das conexões da bancada idealizada. Destacam-se a representação dos interruptores e a disponibilidade dos 3V mediante a associação de duas pilhas cm um fusível em série. Também na parte central está o display responsável pelo controle do pedal assistido PAS

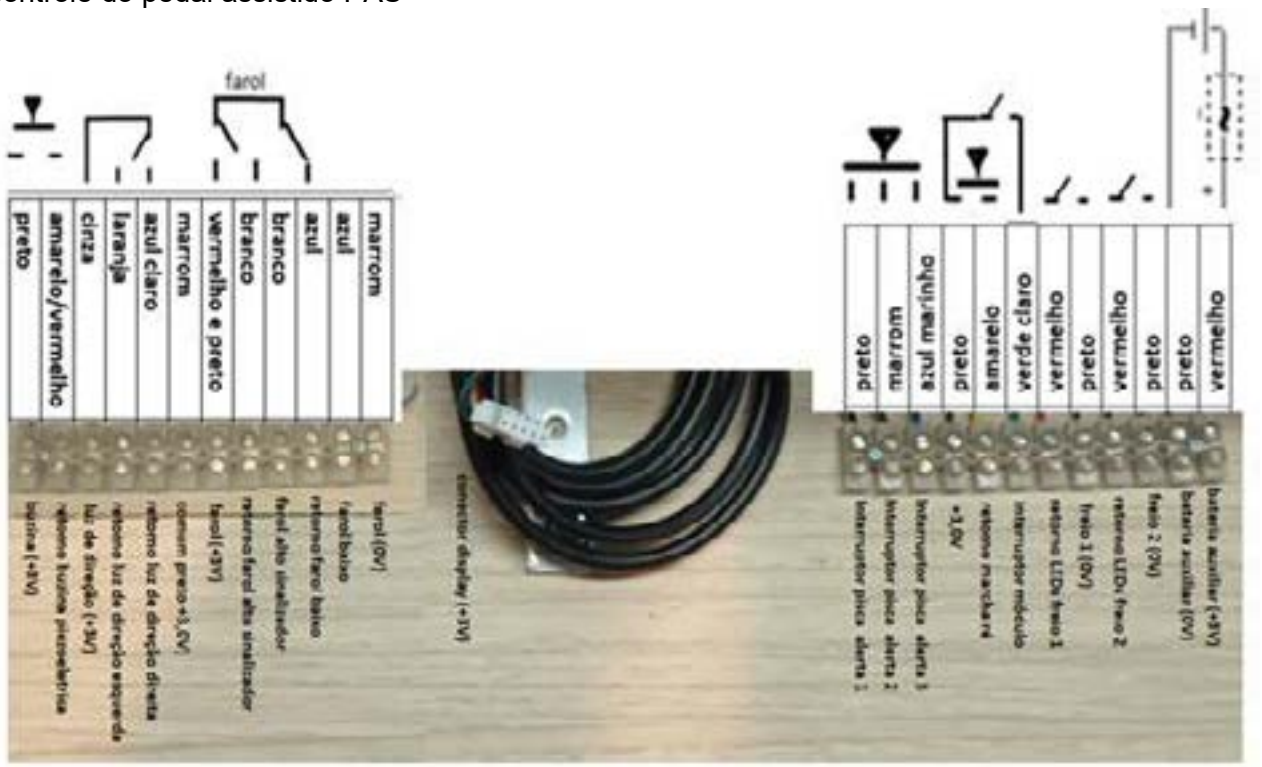


Figura 7: Conectores da bancada de sinalização e iluminação

6. INTERRUPTORES E OPERAÇÃO DA BANCADA DE SINALIZAÇÃO E ILUMINAÇÃO

A instalação inclui os seguintes dispositivos de acionamento adquiridos em uma loja de venda de peças para motocicletas::

6.1. Interruptor de iluminação de nove fios utilizado em motocicleta

O interruptor de nove fios da figura 8 permitiu acionar o farol, sinalizador de direção e buzina.

MARCA	MHX MOTOPARTS
PRODUTO	CHAVE LUZ 9 FIOS
MODELO	TITAN125 KS-04
CÓDIGO	35200-KGA-900

(a) farol luz alta e baixa (b) pisca e buzina (c) referência

Figura 8: Interruptor de nove fios utilizado em motocicleta

6.1.1. Luz baixa e alta com indicador

O farol adaptado incluindo luz baixa e alta com indicador é apresentado na figura 9

(a) LEDs (dois/baixa – quatro/alta) (b) Indicador de luz alta

Figura 9: Adaptação do farol para 3,0V

6.1.2. Sinaleira e iluminação da placa

A figura 10(a) ilustra o acionamento das sinaleiras da régua dianteira com LEDs 5mm brancos e a luz de placa da régua traseira e sinaleiras com LEDs vermelhos na régua traseira é vista na figura 10(b).

(a) brancos sinaleiras dianteiras

(b) vermelhos - sinaleiras e branco - luz de placa

Figura 10: LEDs utilizados respectivamente nas réguas de sinalização dianteira e traseira

6.1.3. Buzina com transdutor *piezoelétrico*

A buzina foi implementada usando um transdutor *piezoelétrico*, visto na figura 11, que opera de 3,0 a 24V.

(a) vista frontal do dispositivo (b) operação de 3 a 24V (c) símbolo

Figura 11: Buzina piezoelétrica

6.1.4. Indicador de direção com LED especial

Visando diminuir custos e eliminar o relé específico para a função e seus soquetes, os LEDs indicadores de direção da régua dianteira utiliza LEDs amarelos de 5mm piscantes, como ilustra a figura 12.

É importante ressaltar que a utilização de LEDs piscantes na instalação dispensa a utilização de relés de pisca, que neste caso ainda teriam que ser específicos para a utilização pois não seriam comercialmente disponíveis

(a) Esquerda (b) Direita

Figura 12: Régua dianteira

O mesmo acontece com os LEDs indicadores de direção da régua traseira, vista na figura 13.

a) Esquerda b) Direita

Figura 13: Régua traseira

6.2. Interruptor do pisca alerta universal utilizado em motocicletas

Por questões estéticas foi utilizado um interruptor empregado em motocicletas da figura 14, para implementar a função pisca alerta acionando simultaneamente os quatro LEDs amarelos usados nos indicadores de direção das réguas dianteira e traseira das figuras 12 e 13

MARCA	MHX MOTOPARTS
PRODUTO	INTERRUPTOR DO PISCA ALERTA COM SUPORTE PARA FIXAÇÃO
MODELO	UNIVERSAL
CÓDIGO	RD-51776

(a)produto (b) referência do produto

Figura 14: Interruptor pisca alerta universal para motocicletas

6.3. Manetes de freio com interruptor comercializadas para bicicletas

Uma das manetes de freio utilizadas são vistas na figura 15(a). Esta manete inclui um interruptor além do cabo metálico de acionamento.
Na figura 15(b) é ilustrado o acionamento de um dos LEDs vermelhos de 5mm da régua traseira que permitem sinalizar a frenagem.
Como nos veículos convencionais essa sinalização se dá de forma dupla e nas extremidades do para-choque traseiro, aqui representado pela régua de testes traseira vista na figura 15(c).

(b) LED sinalizador

(a) Manetes com interruptor (c) Vista régua traseira

Figura 15: Sinalização de frenagem

A manete da figura 15(a) ao mesmo tempo que sinaliza a frenagem por meio dos dois LEDs traseiros tem a função de desligar o controlador através de um nível ativo baixo no momento da frenagem, como pode ser verificado pela análise do diagrama em blocos simplificado da figura 16.

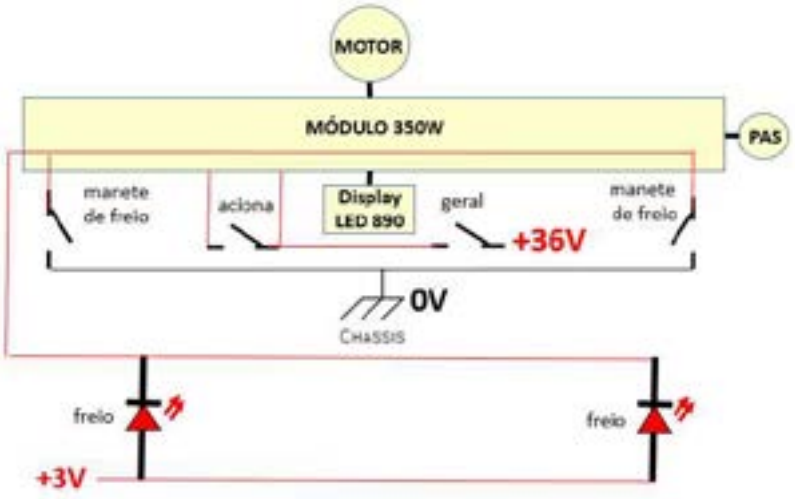


Figura 16: Diagrama em blocos de controlador com botão de ré

6.4. Interruptor de emergência e botão de partida utilizado em motocicletas

Também por questões estéticas, foi adaptado um conjunto interruptor de emergência e partida para motocicletas, visto na figura 17.

6.4.1. Alimentação do módulo controlador

De acordo com o diagrama simplificado da figura 18, o interruptor de emergência pode acionar o módulo controlador.

(a) produto

MARCA	CONDOR
PRODUTO	CONJUNTO INTERRUPTOR DE EMERGÊNCIA E PARTIDA
MODELO	XR 250 01 a 05
CÓDIGO	1102324

(b) referência do produto

Figura 17: Conjunto interruptor de emergência e partida

6.4.2. Diagrama em blocos de controlador genérico com botão de ré

Da mesma forma o botão de partida originalmente utilizado para acionar o motor de partida de motocicletas a combustão, pode acionar a marcha ré, quando esta estiver disponível no controlador, o que não é o caso do utilizado neste trabalho. Esta função é lustrada no diagrama da figura 18, porém na eventualidade de se ter um módulo não muito trivial teria que ser desenvolvido um módulo a parte, para acionar a luz de ré. Provavelmente este será um assunto proposto em um artigo subsequente.

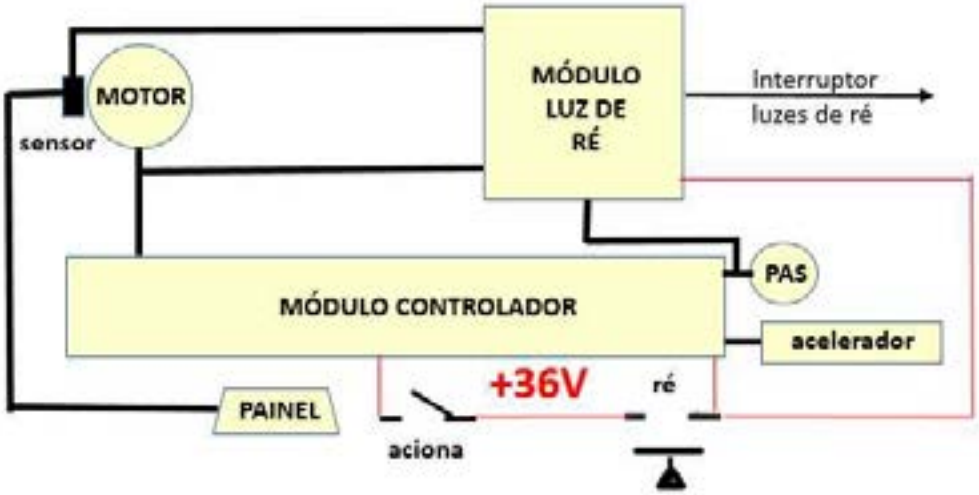


Figura 18: Diagrama em blocos de controlador genérico com botão de ré

6.4.3. LEDs sinalizadores de marcha ré alimentados na régua de testes

De todas formas, mesmo sem a função específica os LEDs de sinalização de marca a ré foram adaptados, operando a mesma tensão de 3,0V como ilustra a figura 19.

Figura 19: LEDs sinalizadores de ré na régua traseira

7. PROJETO ASSISTIDO POR COMPUTADOR DA INSTALAÇÃO

Na figura 20 é apresentado o projeto Assistido por Computador ou CAD – *Computer Aided Design*, da instalação de iluminação e sinalização da tricicleta utilizando o *software* Proteus

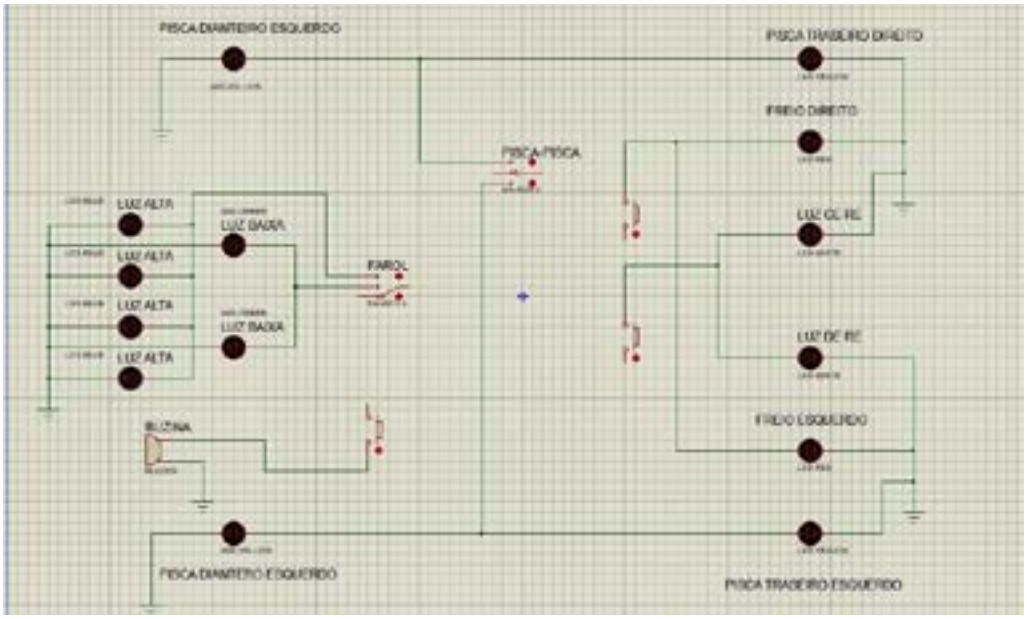


Figura 20: Projeto assistido por computador da instalação elétrica

8. PROTÓTIPO IMPLEMENTADO

Na figura 21, tem-se o anteprojeto da instalação na tricicleta

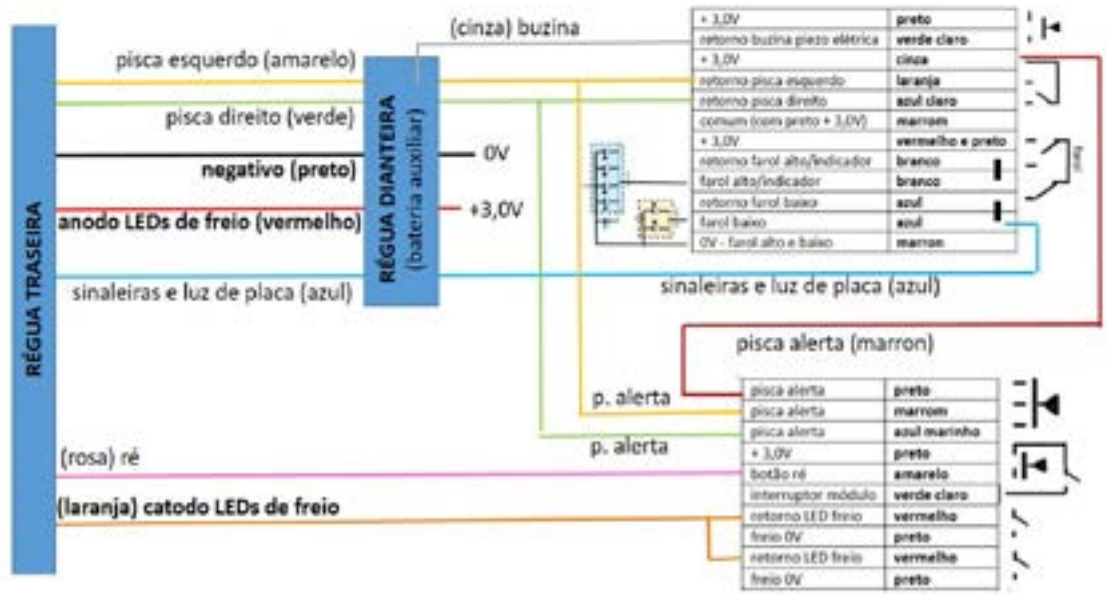


Figura 21: Instalação dos circuitos de iluminação e sinalização na tricicleta

Na figura 22, tem-se um exemplo de projeto de chicote mediante o uso de conectores

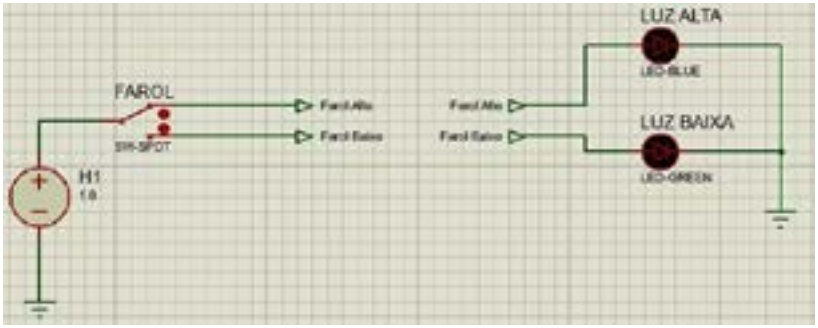


Figura 22: Alternativa para o projeto de chicote utilizando conectores no *software*

Na figura 23, tem-se imagens da dianteira da tricicleta com o farol e sinaleiras operando

(a)farol baixo e sinaleira (b)farol alto

Figura 23: Implementação da instalação na tricicleta

CONCLUSÃO

Usuários, especialmente os de baixo poder econômico, sentem a falta de arquiteturas simples e econômicas, que visam o essencial de uma aplicação. No caso dos veículos elétricos isso se traduz na possibilidade de realizar determinado deslocamento, desvinculando a tradicional dependência tecnológica e dificuldade de manutenção do veículo, que onera e por vezes inviabiliza o uso final. A *tricicleta* elétrica, é um veículo simples, bem mais barato do que um triciclo, que pode auxiliar na entrega de cargas leves e na mobilidade urbana sustentável. Especialmente em regiões planas como o litoral, os níveis de irradiação solar, ventos e o movimento das ondas, tornam a aplicação deste veículo elétrico, compatível com as energias renováveis. Neste artigo, foi abordado um tema pouco frequente na literatura que é a proposição e projeto da instalação elétrica veicular deste protótipo. Tendo em vista seu efeito estético, interruptores de motocicletas disponíveis no ECPC-VC, foram utilizados na instalação, embora a utilização de dispositivos mais simples seja viável e muito mais econômica.. Um desenho com o ante projeto do sistema é apresentado. Posteriormente foi utilizado um *software dedicado* para representar o projeto. O projeto pode ser justificado como um aprendizado e aplicação, beneficiando a circulação segura do protótipo de um veículo

elétricos simples contendo circuitos de iluminação e sinalização. Os *LEDs – Light Emmiter Diodes,* e o conceito introduzido de SP – Sinalização Pontual, contribuíram para reduzir drasticamente o custo do protótipo, e seu consumo de energia.

AGRADECIMENTO

O grupo agradece o apoio dos organizadores do RENOMAT e em especial ao Prof. Lírio Schaeffer, pelo incentivo às iniciativas.

Referências

[1] BASTOS P.W.S, Tricicleta elétrica uma alternativa para a população de baixa renda, 23º Salão de Iniciação Científica da PUCRS, 2022, orientação Prof. Dr. Vicente Mariano Canalli

[2] CANALLI V.M., Projeto guarda-chuva de veículos Elétricos – Veículos Urbanos Viáveis, Iniciação Científica, PUCRS, 2022

[3] FORMULÁRIO DE VISTORIA – DETRAN RS, 2022

44º SENAFOR

28th International Forging Conference
13th International Sheet Metal Forming Conference / 10th BrDDRG Congress
13th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies – Brazil/RS
2nd International Conference on Innovation in Materials and Manufacturing
Hotel Plaza São Rafael – P. Alegre RS, October 1-3, 2025

ESTUDO DA FUNÇÃO E DISTRIBUIÇÃO DE CIRCUITOS DE VEÍCULO ELÉTRICO COMERCIAL SINISTRADO COM BASE NAS CAIXAS DE FUSÍVEIS DE PROTEÇÃO

Orides Jeremias Wachholz - Autor [1]
Jorge Pimentel de Morais - Autor [2]
Johnatan Pacini Bortoloto - Autor [3]
Lucas Melo Machado - Autor [4]
Marçal Rodrigues Pires - Orientador [5]
Vicente Mariano Canalli - Orientador [6]

RESUMO

Aspectos importantes relacionados ao crescente advento dos veículos elétricos comerciais e também às catástrofes climáticas, serviram de motivação para este levantamento. Um dos maiores problemas enfrentados nos veículos elétricos na atualidade é a complexidade e pouca informação prática acerca de seus circuitos. De posse de um veículo elétrico comercial sinistrado nas enchentes de 2024 no Rio Grande do Sul, foi efetuado um levantamento e proposta uma metodologia de abordagem, que analisa a alimentação dos comandos e circuitos a partir de suas caixas de fusíveis.

Palavras Chave — Veículos Elétricos, Veículo sinistrado, Distribuição de circuitos, Módulo de proteção e comando

[1] Electrical Engineering Student; CNPq Energy and Gas Application Group, Brazil
[2] Mechanical Engineer, CNPq Energy and Gas Application Group, Brazil
[2] Production Engineer Student, CNPq Energy and Gas Application Group, Brazil
[3] Materials Master's Student -, Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul, Brazil
[4 Professor Doctor Engineer - Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul, Brazil.
[5] Doctor Engineer - SSRC-VC – Space for Science Research and Culture V. Canali, Brazil.

Estas caixas são denominadas de *Passenger Compartment Fuse Box* ou Caixa de Fusíveis no Compartimento de Passageiros *e Engine Compartment Fuse Box* ou Caixa de Fusíveis no Compartimento do Motor, de onde deriva a maior parte dos circuitos eletroeletrônicos do veículo analisado. Figuras ilustrando os comandos e funções dos circuitos do veículo, são relacionadas com tabelas que identificam os respectivos fusíveis na *Passenger Compartment Fuse Box e Engine Compartment Fuse Box*. A estratégia inicial descrita nesse artigo, tem a intenção de ser um ponto de partida para auxiliar na difícil tarefa de manutenção deste tipo de veículo, quando se busca garantir que os circuitos atingidos recebam a alimentação adequada.

STUDY OF THE FUNCTION AND DISTRIBUTION OF CIRCUITRY IN A DAMAGED COMMERCIAL ELECTRIC VEHICLE BASED ON PROTECTIVE FUSE BOXES

Orides Jeremias Wachholz - Author (1)
Jorge Pimentel de Morais - Author (2)
Johnatan Pacini Bortoloto - Author (3)
Lucas Melo Machado - Author (4)
Marçal Rodrigues Pires - Adviser (5)
Vicente Mariano Canalli - Adviser (6)

ABSTRACT

Important aspects related to the growing advent of commercial electric vehicles and climate disasters served as motivation for this survey. One of the biggest problems facing electric vehicles today is the complexity and lack of practical information about their circuits. Using a commercial electric vehicle damaged in the 2024 floods in Rio Grande do Sul, a survey was conducted and a methodology proposed, analyzing the power supply to the controls and circuits from their fuse boxes. These boxes are called Passenger Compartment Fuse Boxes and Engine Compartment Fuse Boxes, from which most of the vehicle's electronic circuits are located. Figures illustrating the vehicle's circuit controls and functions are linked to tables identifying the respective fuses in the Passenger Compartment Fuse Box and Engine Compartment Fuse Box. The initial strategy described in this article is intended to serve as a starting point to assist in the difficult task of maintaining this type of vehicle, ensuring that the affected circuits receive adequate power.

1. INTRODUÇÃO

O veículo escolhido para estudos foi um *BYD Dolphin Plus* ano 2024, visto na figura 1(a), atingido pelas enchentes no mesmo ano de sua fabricação. A aparência do veículo, especialmente do cofre dianteiro, onde se encontra a *Engine Compartment Fuse Box,* ou Caixa de Fusíveis no Compartimento do Motor, é similar a de um veículo novo como ilustra a figura 1(b).

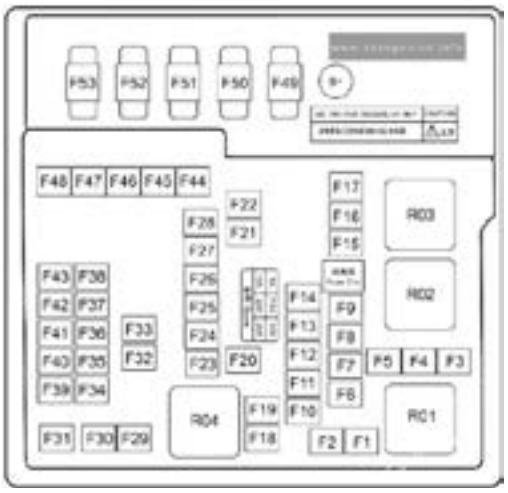
(a) vista do veículo

(b) vista do cofre dianteiro

Figura 1: Aspecto do veículo sinistrado utilizado nos estudos

Além da caixa de fusíveis citada, há também a *Passenger Compartment Fuse Box* ou Caixa de Fusíveis no Compartimento de Passageiros, que fica localizada dentro do veículo, abaixo do painel, próximo aos pedais do lado do motorista. A identificação da numeração dos fusíveis desta caixa aparece na figura 2(a) e na figura 2(b) para a *"Engine Compartment Fuse Box"*

(a) *Passenger Compartment Fuse Box*

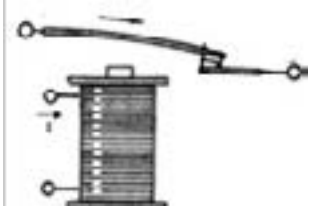


(b) *Engine Compartment Fuse Box*

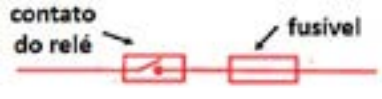
Figura 2: Caixas de fusíveis ou *fuse boxes* do veículo sinistrado [1]

A função dos fusíveis é proteger os circuitos elétricos de sobrecargas e curto-circuitos. Quando a corrente elétrica excede o valor nominal do fusível, ele se funde, interrompendo o fluxo de corrente e evitando danos aos componentes do sistema. O funcionamento dos relés tem base no eletromagnetismo sendo ilustrado na figura 3.

(a)desativado [2]



(b) ativado [2]



(c) conexão com fusível [3]

Figura 3: Operação e conexão de um relé

Parte-se do relé desativado visto na figura 3(a). Na figura 3(b), uma pequena corrente "I" circula em um enrolamento produzindo um campo magnético capaz de atrair magneticamente um metal, de forma a ativar um contato elétrico entre os terminais,

permitindo a circulação de uma corrente muito maior que a utilizada em seu acionamento magnético. Assim é possível controlar circuitos de potência com botões e interruptores simples e fáceis de acionar.
Conforme [3], em sistemas automotivos, os relés podem ser utilizados para habilitar a corrente de baterias, reduzir surtos de corrente. Nas unidade de distribuição seus contatos são associados em série com fusíveis, como ilustra a figura 3(c).
Os controles acoplados ao volante do veículo, apresentados na figura 4 atestam a sua complexidade. Além das funções relacionadas a tela multimídia, destacam-se os sistemas de controle de câmera, reconhecimento de voz e de cruzeiro.

1-Câmera panorâmica 360º
2-Rotação elétrica
3- Controle de cruzeiro
4-Botão SET
5-Alavanca
6-Botão RESET
7-Botão cancelar
8-Botão telefone
9-Reconhecimento de voz
10-Cursor direita
11-Botão MODO
12-Seletor
13-Tecla de retorno
14-Cursor esquerda

(a)lado esquerdo (b)quadro de funções (c) lado direito

Figura 4: Botões e teclas no volante veículo elétrico sinistrado – Adaptado de [4]

A metodologia descrita nesse artigo tem por objetivo, realizar uma descrição técnica, descrevendo a relação entre os fusíveis, e a ativação dos circuitos eletroeletrônicos do veículo analisado. Apresentar também, os entraves provocados pela corrosão de conectores e condutores elétricos, originando defeitos na alimentação em função da elevação da resistência ôhmica de contato. Neste caso é necessário conhecer os sistemas, suas funções e formas de ativação, relacionando os mesmos a seus fusíveis de alimentação para, de posse destes dados, tomar as medidas necessárias para corrigir as falhas apresentadas.

2. HABILITAÇÃO DAS BATERIAS E DE CIRCUITOS DE CARGA E ALIMENTAÇÃO

O quadro 1 apresenta fusíveis *Passenger e Engine Fuse Box*, relacionados diretamente com as baterias principal e auxiliar. A operação de tais baterias é crucial para a alimentação do sistema, e também de reboque e conectores USB.
O veículo possui também o sistema de carregamento *onboard*, que envolve proteção elétrica e carregamento combinado entre bateria principal e bateria auxiliar.

Passenger Compartment Fuse Box	***Engine Compartment Fuse Box***
Sistema de carregamento combinado 14 - CCS - *Combined Charging System*	F23/F27 - Fusíveis da **bateria auxiliar**
	Sistema de Proteção Elétrica de Carregamento F50 – CEPS – *Charging Electric Protection System*
20 – *Wireless charger*	Tomadas para conexão padrão serial universal F24/F25/F28 - USB - *Universal Serial Bus*
1- Carregador wireless para celular	
Alimentação para reboque 02 – Towing power suply	F49 – Fusível da bateria principal

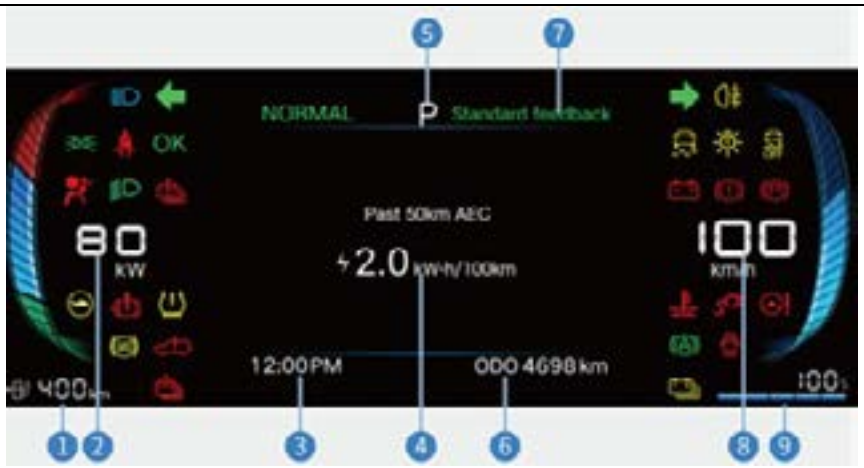
Quadro 1: Fusíveis de baterias, sistema de carga e alimentação - Adaptado de [1]

Durante o funcionamento do veículo, a bateria principal de alta tensão é responsável por transferir energia e manter a carga plena da bateria auxiliar de baixa tensão (12V).

A bateria auxiliar, é responsável pela alimentação dos fusíveis de todos os sistemas eletrônicos e de acionamento do veículo. Dessa forma, o fato de se ter a bateria auxiliar descarregada representa um entrave para o teste dos sistemas.

3. ALIMENTAÇÃO DO PAINEL ELETRÔNICO DE INSTRUMENTAÇÃO

Por ocasião de avarias, uma das características mais comuns é que o painel eletrônico de instrumentos do veículo da figura 5(a) esteja inoperante, estando indisponíveis as indicações vistas na figura 5(b).



1-Autonomia
2-Indicador de potência disponível
3-Relógio
4-Visor de informações
5-Indicador de marcha
6-Odômetro total
7-Modo de regeneração
8-Velocímetro
9-SOC – *State of Charge* - Estado de carga da bateria de tração

(a)vista do painel (b) indicações

Figura 5: Painel eletrônico do veículo – Adaptado de [5]

O quadro 2 apresenta fusíveis da *Passenger e Engine Fuse B*ox, relacionados diretamente com as baterias principal e auxiliar.

Passenger Compartment Fuse Box	***Engine Compartment Fuse Box***
05 – Instrumentation cluster	F36 - Instrumentos

Quadro 2: Fusíveis relacionados a instrumentação - Adaptado de [1]

4. CIRCUITOS DE ALIMENTAÇÃO EXCLUSIVA DA *PASSENGER FUSE BOX*

Embora o conjunto de interruptores das portas, sirva para travamento das portas como ilustrado na figura 6, a referência descreve apenas os circuitos de acionamento de vidros da figura 6(b) e 6(c) somente na *Passenger Fuse Box*, de acordo com o quadro 3.

(a) trava elétrica das portas (b)vidro elétrico (c) trava do vidro

Figura 6: Conjunto de interruptores das portas – Adaptado de [4]

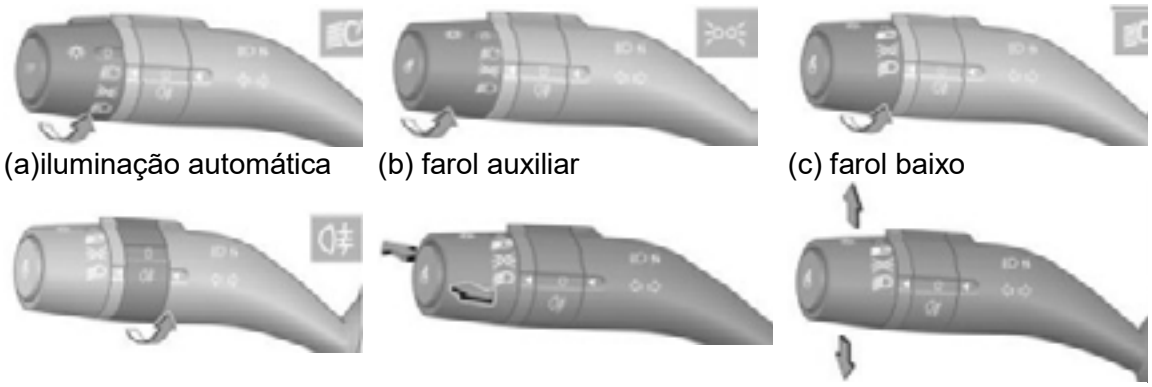
O quadro 3 também indica o fusível de alimentação da porta de diagnóstico OBD – On-Board Diagnostic que é um plugue universal utilizada na manutenção. Esta porta é fundamental para executar testes e diagnósticos no processamento do veículo. Desta forma é possível conhecer o status dos subsistemas do automóvel, podendo auxiliar na manutenção preventiva, descobrindo defeitos antes que os mesmos ocorram.

Passenger Compartment Fuse Box	16 - Vidro dianteiro direito
04 – Diagnosis port	17 - Vidro traseiro esquerdo
15 - Vidro dianteiro esquerdo	18 - Vidro traseiro direito

Quadro 3: Fusíveis relacionados a instrumentação - Adaptado de [1]

5. RELAÇÃO ENTRE O INTERRUPTOR DE COMBINAÇÃO E AS *"FUSE BOXES"*

Os interruptores de combinação esquerdo e direito estão localizados na barra do volante. Interruptor de combinação esquerdo serve para o controle de iluminação e sinalização conforme a figura 7.

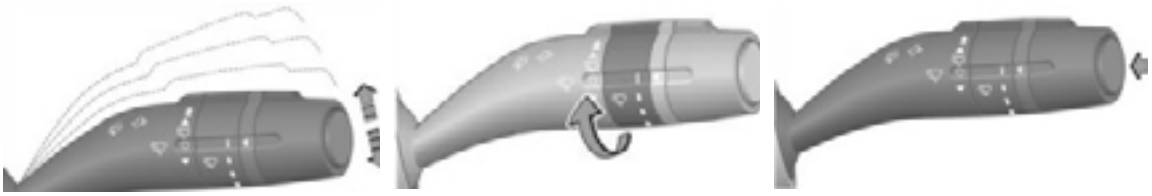


(a)iluminação automática (b) farol auxiliar (c) farol baixo

(d)luz de neblina traseira (e) farol alto (f) sinalizador de direção

Figura 7: Interruptores de controle de iluminação e sinalização – Adaptado de [4]

Já o interruptor de combinação direito controla os limpadores de para-brisa de acordo com a figura 8.
Na lista não se encontra a luz de neblina traseira, nem o sinalizador de direção



(a) desligamento e seleção (b) intervalado de limpeza (c) lavador dianteiro

Figura 8: Controle dos limpadores de para-brisa – Adaptado de [4]

De acordo com o quadro 4, há fusíveis relacionados com os interruptores de combinação direito e esquerdo, tanto na *Passenger quanto na Engine Fuse B*ox

Passenger Compartment Fuse Box			***Engine Compartment Fuse Box***
Interruptores de combinação 11 - Combination *switches*	esquerda		F10 – luz esquerda combinada
			F11 – luz direita combinada
			F20 – farol diurno
	direita		F21 – limpador dianteiro
			F48 – limpador traseiro

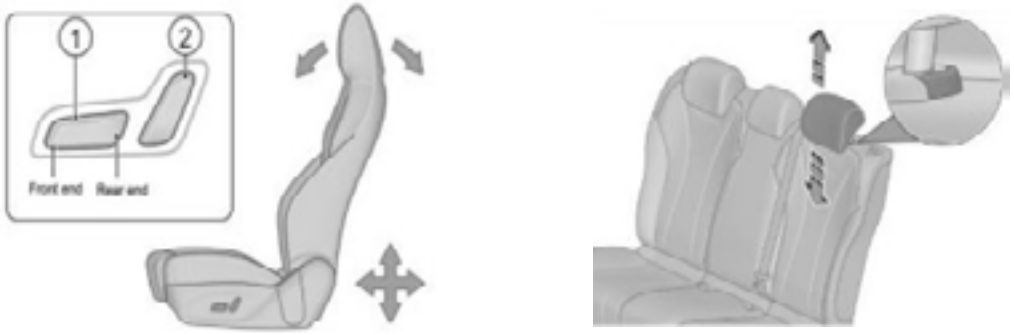
Quadro 4: Fusíveis relacionados ao interruptor de combinação – Adaptado de [1] e [4]

6. FUSE BOXES DE CONTROLE E ALIMENTAÇÃO DOS CIRCUITOS DOS ASSENTOS

O quadro 5 sintetiza os fusíveis da *Passenger Compartment Fuse Box* e da *Engine Compartment Fuse Box* que têm relação com a alimentação dos assentos dianteiros esquerdo e direito e também do controle do banco traseiro.
A figura 9 ilustra os tipos de ajuste de posição e encosto proporcionados pelo veículo elétrico estudado.

Passenger Compartment Fuse Box	***Engine Compartment Fuse Box***
21 – alimentação do assento dianteiro esquerdo	F35 - controle do banco traseiro
22 – alimentação do assento dianteiro direito	

Quadro 5: Fusíveis relacionados ao controle e alimentação dos assentos – Adaptado de [1]



(a)ajuste de posição (b) ajuste de encosto

Figura 9: Ajuste elétrico do banco dianteiro – Adaptado de [4]

7. SISTEMA DE FRENAGEM E ACIONAMENTO DO VEÍCULO E AS FUSE BOXES

O quadro 6 sintetiza os fusíveis da *Passenger Compartment Fuse Box* e da *Engine Compartment Fuse Box* relacionados aos sistemas de frenagem e acionamento do veículo estudado.

Passenger Compartment Fuse Box	***Engine Compartment Fuse Box***
Controlador universal 01 – VCU - *Vehicle Control Unit*	F14 - Módulo de Controle de Velocidade Principal
Sistemas avançados de assistência ao motorista 10 – ADAS - *Advanced Driver Assistance Systems*	Sistema Avançado de Assistência ao Motorista F39 - ADAS - Advanced Driver Assistance Systems
Console central 07 – *Gearshift panel*	Controle Eletrônico do Acelerador F37 - ETC - Electronic Throttle Control
Interruptor de freio de estacionamento elétrico EPB – *Electronic Parking Brake*	Direção Elétrica Assistida F41 - EPS - Electronic Power Steering
Interruptor de retenção automática do veículo AVH – *Auto Vehicle Hold*	Sistema de Retenção Suplementar F38 - SRS - Supplemental Restraint System
Interruptor de desativação do ESP - *Electronic Stability Program*	Controle Eletrônico de Estabilidade F42/F44 - ESC - Electronic Stability Control

Quadro 6: Fusíveis relacionados ao acionamento e seus sistemas – Adaptado de [1]

Os sistemas de frenagem estão associados ao console central mediante um fusível da *Passenger Compartment Fuse Box* especialmente através dos seguintes controles:

a) EPB – *Electronic Parking Brake* – Interruptor de freio de estacionamento elétrico

Um freio de estacionamento eletrônico (EPB), cujo interruptor é visto na figura 10(a), também conhecido como freio de estacionamento elétrico, é um freio de estacionamento controlado eletronicamente, por meio do qual o motorista ativa o mecanismo de retenção com um botão e as pastilhas de freio são aplicadas.

b) AVH – *Auto Vehicle Hold* - Interruptor de retenção automática do veículo

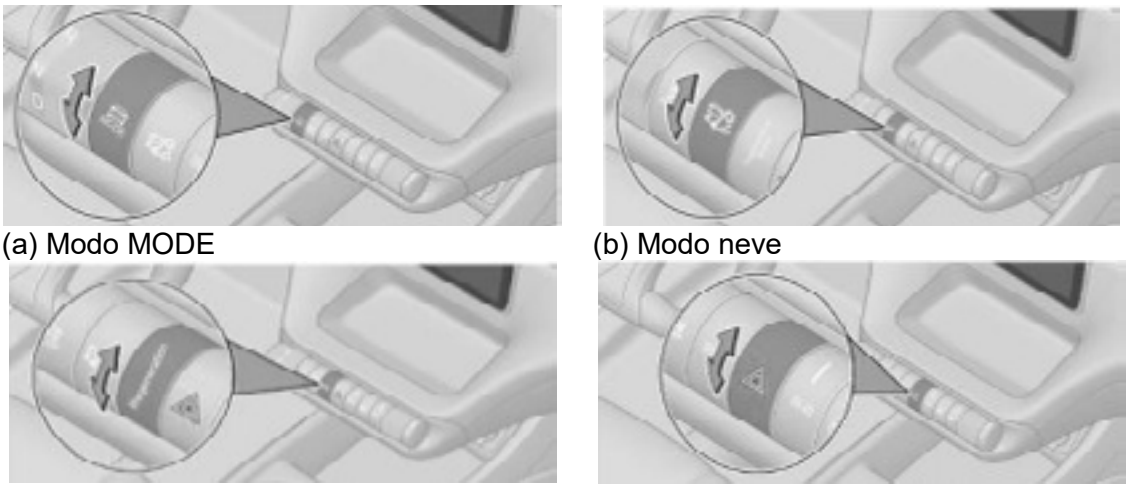
O interruptor de retenção automática é visto na figura 10(b), atuam nos freios de serviço para manter o carro parado durante curtas paradas, com o motor ligado, evitando movimentos acidentais em aclives e o cansaço do motorista em engarrafamentos e semáforos.O Interruptor de desativação do ESP - *Electronic Stability Program*, visto na figura 10(c), faz parte do Controle Eletrônico de Estabilidade, que encontra fusíveis relacionados tanto na *Passenger Compartment Fuse Box* quanto na *Engine Compartment*

Fuse Box via o ESC - *Electronic Stability Control* servindo para corrigir a trajetória em situações de instabilidade.

(a)interruptor EPB (b) controle AVH (c) desativação ESC

Figura 10: Controles de frenagem e condução no console central – Adaptado de [4]

Os controles do assistente de condução são vistos na figura 11



(a) Modo MODE (b) Modo neve

(c) Regeneração (d) Luzes de perigo

Figura 11: Controles do assistente de condução – Adaptado de [4]

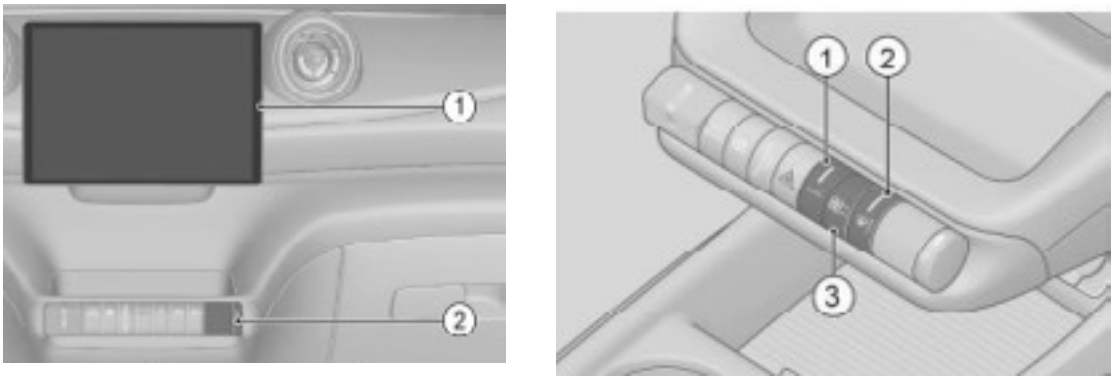
8. FUSIVEIS RELACIONADOS AO MONITORAÇÃO E SISTEMAS PERIFÉRICOS

Os fusíveis relacionados com o sistema de monitoração e entretenimento e ao controle e alimentação de periféricos são diversificados e descritos no quadro 7 tanto na *Passenger Compartment Fuse Box* quanto na *Engine Compartment Fuse Box.*

Passenger Compartment Fuse Box	***Engine Compartment Fuse Box***
08 – Infotainment system	F15 - Módulo de Controle de Temperatura
	F52 – fusível ventilador elétrico
	F13 - bomba de água de refrigeração
03 - Brake light switch	F9/F36 - Tela LCD - *Liquid Crystal Display*
Módulo de controle traseiro da carroceria 12/13 – BCM - *Rear Body Control Module*	Aquecedor Interno de Coeficiente de Temperatura Positivo F16 - PTC - Positive Temperature Coefficient
19 - E- call	F34 - Aquecedor do volante
09 – external amplifier	F45 – ventilador - blower
06 - Alcohol interlock	F12 - compressor

Quadro 7: Fusíveis ao sistema de monitoração e controle de periféricos – Adaptado de [1]

A tela de exibição multimídia indicada com o número 1, na figura 12(a).
Quando a energia estiver no modo OK a imagem inicial será exibida por alguns segundos e o sistema multimídia começará a funcionar. O botão liga/desliga e de volume é indicado com o número 2 na mesma figura. O fusível deste Sistema de informação e lazer ou *Infotainment System* se encontra *no Passenger Compartment Fuse Box*



(a)tela multimídia (b) controles do ar condicionado

Figura 12: Tela e controle do ar condicionado console central – Adaptado de [4]

CONCLUSÃO

Foi estudado o Compartimento de Fusíveis do Motor, ou *Engine Compartment Fuse box* no intuito de mapear os principais circuitos elétricos e funções, encontrados em um veículo elétrico comercial sinistrado. A instalação e distribuição elétrica do veículo é bastante complexa em função da tecnologia avançada utilizada e da quantidade de sistemas e dispositivos de conforto e segurança. A literatura foi consultada, visando buscar a relação entre os circuitos elétricos do veículo e cada fusível. Desta forma é sugerido um teste de continuidade, porém associado ao acionamento de cada relé mediante a utilização de uma fonte externa. Além disto, constatou-se a presença de outra caixa no interior do veículo denominada de *Passenger Compartment Fuse Box,* pesquisando-se a função de cada um de seus fusíveis. Em um primeiro momento está sendo realizado também um estudo sobre a bateria auxiliar, uma vez que será necessária para habilitar a operação dos relés. Esta bateria de baixa tensão, pode ser carregada através da bateria principal, tornando de certa forma os circuitos elétricos do veículo interdependentes. Assim um próximo passo será a montagem e utilização de um elevador de automóveis para retirada e estudo de viabilidade de recuperação e recarga da bateria principal, além da retirada e exame físico e elétrico de continuidade nas *Fuse box,* prevê-se em um primeiro momento a substituição de conectores. A recuperação de veículos elétricos sinistrados demonstra ser uma tarefa cara e difícil, tendo em vista a escassez de informações especificas e a necessidade de aquisição e substituição de componentes. Embora o ônus verificado, a busca de alternativas econômicas de manutenção demanda bastante tempo e um entendimento detalhado tendo em conta uma boa noção física da função e operação de cada componente elétricos.

AGRADECIMENTO

O grupo agradece o apoio dos organizadores do RENOMAT e em especial ao Prof. Lírio Schaeffer, e também ao proprietário do veículo Johnatan Bortolotto e seu pai Valderino pelo incentivo às iniciativas.

Referências

[1] (2025) YOUTUBE – Fusebox location and diagrams - (BYD Dolphin (2021-2023) - https://www.youtube.com/watch?v=vddb8aXQGGA

[2] ECPC-VC – Apostila Relés Miniatura, 2026

[3] SHU X., YANG W, A reliability study of electric vehicle battery from the perspective of power supply system, Journal of Power Sources · March 2020

[4] BYD Dolphin, Guia rápido. 2024, 192p

[5] BYD Dolphin, Manual do proprietário. 2024, 97p

44º SENAFOR

28th International Forging Conference
13th International Sheet Metal Forming Conference / 10th BrDDRG Congress
13th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies – Brazil/RS
2nd International Conference on Innovation in Materials and Manufacturing
Hotel Plaza São Rafael – P. Alegre RS, October 1-3, 2025

ESTUDO TEÓRICO PRÁTICO DE ADAPTADOR DE CARGA DE VEÍCULO ELÉTRICO COMERCIAL

Orides Jeremias Wachholz - Autor [1]
Jorge Pimentel de Morais - Autor [2]
Johnatan Pacini Bortoloto - Autor [3]
Lucas Melo Machado - Autor [3]
Marçal Rodrigues Pires - Orientador [4]
Vicente Mariano Canalli – Orientador [5]

RESUMO

Com o advento da mobilidade elétrica e a crescente popularização de veículos elétricos, surgem novos dispositivos de abastecimento: os carregadores para veículos elétricos. Sejam lentos, portáteis, ou instalados em centrais de recarga rápida, são excenciais para que a mobilidade se torne cada vez mais acessível aos usuários. Este artigo tem por objetivo, elucidar as diferenças entre os conectores para recarga específicos, tanto os que acompanham os veículos, disponibilizados pelos fabricantes, quanto os dispositivos de postos de recarga de alta demanda. Apresentar e proporcionar um incremento no conhecimento teórico-prático aos pesquisadores e para a reengenharia brasileira. Porém, embora simples, muita pouca informação acerca destes carregadores e adaptadores está disponível na literatura nacional.

Palavras Chave — Veículo elétrico comercial, Carregamento, Adaptador de carga, Abordagem construtiva

[1] Electrical Engineering Student; CNPq Energy and Gas Application Group, Brazil
[2] Mechanical Engineer, CNPq Energy and Gas Application Group, Brazil
[2] Production Engineer Student, CNPq Energy and Gas Application Group, Brazil
[3] Materials Master's Student -, Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul, Brazil
[4 Professor Doctor Engineer - Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul, Brazil.
[5] Doctor Engineer - SSRC-VC – Space for Science Research and Culture V. Canali, Brazil.

Exceto a documentação simplificada dos manuais de fábrica, ademais as informações são bastante difusas. Buscou-se, através desta elaboração, proporcionar uma maior familiarização, onde a função e diagrama em blocos de um adaptador de carga típico é abordada. Destaca-se sua conectividade, sensoriamento, controle de carga e proteções elétricas adequadasDispositivos RFID - *Radio-Frequency Identification*, habilitam a utilização do adaptador permitindo assim operação interativa, proporcionando a administração de carga da bateria principal. O artigo inclui uma abordagem construtiva prática e a localização de componentes do dispositivo através de fotografias.

THEORETICAL AND PRACTICAL STUDY OF COMMERCIAL ELECTRIC VEHICLE CHARGING ADAPTER

Orides Jeremias Wachholz - Author (1)
Jorge Pimentel de Morais - Author (2)
Johnatan Pacini Bortoloto - Author (3)
Lucas Melo Machado - Author (4)
Marçal Rodrigues Pires - Adviser (5)
Vicente Mariano Canalli - Adviser (6)

ABSTRACT

With the advent of electric mobility and the growing popularity of electric vehicles, new charging devices have emerged: electric vehicle chargers. Whether slow, portable, or installed at fast-charging centers, they are essential for making mobility increasingly accessible to users. This article aims to elucidate the differences between specific charging connectors, both those supplied with vehicles and provided by manufacturers, and devices at high-demand charging stations. It aims to present and provide an increase in theoretical and practical knowledge for researchers and for Brazilian reengineering. However, although simple, very little information about these chargers and adapters is available in the national literature. Aside from the simplified documentation in the factory manuals, the information is quite vague. This article aims to provide greater familiarity by covering the function and block diagram of a typical charging adapter. Its connectivity, sensing, charge control, and adequate electrical protections are highlighted. RFID (Radio-Frequency Identification) devices enable the adapter to be used, thus enabling interactive operation and providing charge management for the main battery. The article includes a practical construction approach and the location of device components through photographs.

.

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas para carregamento de baterias de veículos elétricos se dividem em:
a) Integrados ou *on-board*: Neste caso o carregador está integrado na arquitetura do veículo.
b) Externos ou *off-board*: Neste sistema, o carregador não está integrado ao veículo, mas sim localizado externamente.

Em geral acompanham o adaptador de carga residencial externo de corrente alternada ou *AC wallbox*, uma base de fixação, um cartão de carregamento inteligente que utiliza a técnica RFID - *Radio Frequency Identification* e um kit contendo o manual visto e referenciado na figura 1.

Figura 1: Conteúdo da caixa do carregador Zhida.[1]

Os componentes que acompanham o adaptador de carga *off board* ou carregador CA abordado neste artigo são vistos na figura 1. Este adaptador de carga de corrente alternada é homologado pela BYD com selo CE da Comunidade Europeia.

2. ANÁLISE DOS DADOS NOMINAIS DO ADAPTADOR DE CARGA

Analisando os dados nominais do adaptador de carga são vistos no quadro 1. Verifica-se que o mesmo opera a uma tensão de 230V e com uma potência de saída de 7,0kW.

MARCA - MODELO	ZHIDA - ZDA4-DC1-C12E
POTÊNCIA	7,0kW
CORRENTE NOMINAL	32A
TENSÃO NOMINAL	230V
FREQUÊNCIA	60Hz
GRAU DE PROTEÇÃO	IP55

Quadro 1: Dados nominais do adaptador de carga comercial

Desta forma, é considerado um carregador de Nível 2, sendo destinado ao carregamento noturno da bateria, no intervalo de 6 a 8 horas. Normalmente estes carregadores estão disponíveis comercialmente em tensão de alimentação alternadas de 127V até 240V e em potências de saída, de 3,5 kW a 22 kW. Uma vez que é conectado em corrente alternada a sua frequência de operação é de 60Hz, compatível com o sistema elétrico brasileiro.
Conforme [2], o grau de proteção IP55, de acordo com a ABNT (especificamente a NBR IEC 60529), indica que o equipamento possui proteção limitada contra a entrada de poeira e é protegido contra jatos de água de baixa pressão de qualquer direção. Um dos principais entraves enfrentados pelo usuário técnico é que o manual disponibilizado se limita a fornecer informações gerais tais como precauções de segurança e tópicos de instalação, operação e solução de problemas.

3. ANÁLISE DO CONECTOR DE CARREGAMENTO

O principal objetivo deste artigo é de coletar e organizar informações técnicas importantes, que permitam compreender melhor a nível de blocos a operação deste dispositivo. A abordagem

técnica apresentada teve como ponto inicial, o estudo do conector de carregamento "TYPE 2" utilizado no veículo, cujo processo de recarga, cabos e conector são vistos na figura 2.

(a)processo de recarga (b)cabo do adaptador (c)pinos do conector

Figura 2: Adaptador de carga de corrente alternada marca Zhida disponível no veículo

Como descrito em [3], os tipos de conectores de carregamento, têm uma importância destacada na busca de informações técnicas sobre carregadores para veículos elétricos. Estes conectores variam de país para país, dando indícios da forma de carregamento. Atualmente, a América do Norte utiliza principalmente o padrão SAE J1772 [4], a Europa o padrão IEC 62196 - 1,2,3, [5] - [7] a China o padrão GB/T 20234.1,2 – 2011 [8] - [9] e o Japão o padrão CHAdeMO. A Figura 3(a) mostra os tipos de conectores de carregamento para veículos elétricos em todo o mundo.

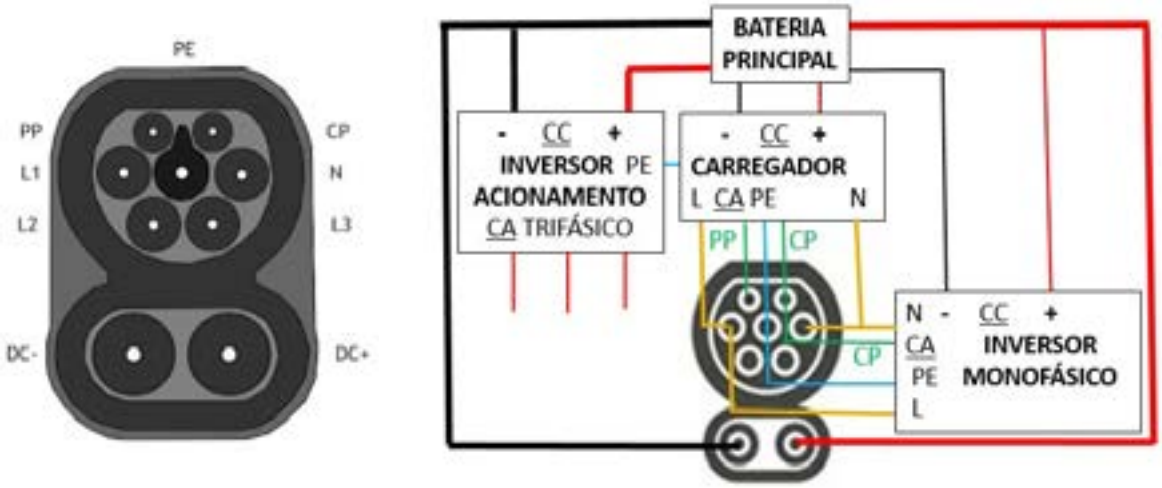
(a)vista de conectores CA e CC (b)identificação lado do cabo

Figura 3: Conectores para carregamento de veículos elétricos

Mantida pela Comissão Eletrotécnica Internacional, a norma IEC 62196 foi destinada a padronizar conjuntos de conectores elétricos e modos de carregamento para veículos elétricos. A definição de contato do conector de carregamento tipo 1 da norma IEC 62196 é a mesma da interface de carregamento CA padrão SAE J1772. No veículo comercial disponibilizado para este estudo, o adaptador de carga utiliza o adaptador Tipo 2 para GB/T. A definição dos contatos do conector de carga tipo 2 da norma IEC 62196 utilizado no adaptador estudado, é mostrada na Figura 3(b). São identificados os pinos de alimentação CA: linha (L1), linha (L2), linha (L3), neutro (N) e terra de proteção (PE) e os pinos de comunicação, Piloto de Controle (*Control Pilot* - CP) e Piloto de Proximidade (*Proximity Pilot* - PP).

5. DIAGRAMA EM BLOCOS SOB O PONTO DE VISTA DO VEÍCULO

O veículo é equipado com um conector IEC 62196. Este conector além de admitir o plug do adaptador de recarga, permite carga rápida utilizando corrente contínua, como pode ser visto na figura 4. O inversor monofásico é um item de série, em veículos que disponibilizam uma tensão alternada a partir da energia armazenada na bateria principal.



(a) Identificação da entrada (b) Diagrama em bloco simplificado no veículo

Figura 4: Sistema de carregamento combinado com entrada **para recarga** IEC 62196

6. DIAGRAMA EM BLOCOS DE UM ADAPTADOR DE CARGA CA TÍPICO

São bastante raros na literatura, diagramas em blocos de tais adaptadores de carga, especialmente sobre os modelos disponibilizados comercialmente. Com base em algumas gravuras disponíveis no site da ST Microelectronics [11] e fotografias foi elaborado o diagrama em blocos simplificado da figura 5.

De acordo com o padrão GBT os pinos "*piloto"* são essenciais para garantir um carregamento seguro e adequado da bateria do VE – veículo elétrico:

a) PP - *Proximity Pilot*: Também denominado de CC ou *Charging Confirmation Pré Insertion Signalling,* sinaliza para o sistema de controle de carga do veículo a conexão física e a corrente nominal do adaptador, mediante um resistor conectado entre os terminais PP e PE de seu plugue**.**

b) CP - *Control Pilot*: sinaliza erros, estado de espera, conexão física e fluxo e finalização de carga, para o sistema de controle interno do veículo, via sinal PWM digital de 1kHz. A tendência de evolução destes sistemas é efetuar uma comunicação alto nível, ou seja, utilizando *software.*

Figura 5: Diagrama em bloco simplificado de um adaptador de carga CA monofásico

7. AUTENTICAÇÃO DO OPERADOR VIA TECNOLOGIA RFID

Conforme [10], o cartão RFID (Identificação por Radiofrequência) é uma tecnologia que utiliza ondas de rádio para transmitir informações entre um leitor e um dispositivo de regarga. No

contexto de veículos elétricos, este cartão é usado para autenticar o proprietário do veículo a pontos de recarga, permitindo um processo de recarga monitorada e devidamente relacionado à sua unidade consumidora e/ou posto de recarga elétrica. Este sistema permite identificação rápida e sem contato. Como os cartões RFID não requerem alimentação interna, são duráveis e menos sujeitos a falhas, tornando-os uma opção confiável para motoristas de veículos elétricos.
Os cartões RFID para carros elétricos operam em diversas frequências, cada uma adequada a diferentes aplicações:
a) Baixa Frequência (LF): 125 ou 134,2 kHz
b) Alta Frequência (HF): 13,56 kHz – a mais comum em estações de recarga.
c) Ultra Alta Frequência (UHF): 868 a 956 MHz
d) Frequência de Micro-ondas: 2,45 GHz

Em um adaptador de carga do Tipo 2, basta aproximar o cartão do leitor RFID localizado na parte frontal do carregador, para identificar e autenticar o usuário iniciando a sessão de carregamento. Assim é possível aplicar o conector Tipo 2 na porta de carregamento do veículo como na figura 3(a). O processo de carregamento pode ser automatizado ou aguardar confirmação com o uso do aplicativo do veículo. Para encerrar a sessão, basta encostar o cartão RFID novamente no leitor e desconectar o conector tipo 2.

8. ANÁLISE INTERNA DO ADAPTADOR DE CARGA

Neste item é realizada uma análise interna do adaptador de carga utilizando fotografias. A figura 6(a) mostra o adaptador de carga aberto, identificando-se a placa principal e do circuito RFID. Na figura 6(b) é vista a placa RFID, que além do sensor, possui chips e componentes de tecnologia SMD – *Surface Mount Device* de difícil manutenção. Na placa principal destacam-se três LEDs da mesma tecnologia da figura 6(c) e os extensores ópticos da figura 6(d), que conduzem a sinalização dos LEDs de aviso - *warning*, de carga - *charge* e de operação - *operation* do painel

(a)Adaptador de carga aberto

(b) placa RFID

(c) LEDs SMD

(d) extensores ópticos

Figura 6: Fotografias internas do adaptador de carga

Na figura 7(a) é ilustrada a placa principal, identificando com uma circunferência, dois micro interruptores. Desligando-se o disjuntor de alimentação do adaptador, a troca de posição do micro interruptor superior, limita a corrente do carregador a 16A. A troca de posição do interruptor inferior serve para eliminar a necessidade do cartão RFID, ou seja, o carregamento inicia imediatamente após o plugue de carga ser conectado. A troca de posição citada é ilustrada na figura 7(b) e 7(c).

Até o momento, na internet praticamente não se encontram fotografias como a da figura 7(d), do verso da placa do adaptador onde estão os parafusos dos terminais PE, L, N para conexão. O que surpreende na visualização nesta placa é a presença de um chip de tecnologia SMD, não identificado, de 144 pinos visto na figura 7(e), oferecendo uma ideia de complexidade da placa para eventuais manutenções. Da análise interna do adaptador é possível verificar que na placa, chegam através do cabo de alimentação visto na figura 7(f) os condutores PE, L, N e CP ou seja, o terminal PP não tem conexão a placa. Todavia, medidas de resistência efetuadas entre o terminal PP e PE, indicam uma resistência próxima a 220Ω. Segundo [12], o valor desta resistência informa ao sistema a corrente nominal do cabo utilizado.

(a)vista superior placa principal

(d) vista inferior placa principal

(b)32A RFID

(c) 16A sem RFID

(e)Chip SMD 144 pinos

(f)Fiação PE, L, N e CP

Figura 7: Fotografias internas das placas e dispositivos do adaptador de carga

Os demais componentes identificáveis compreendem sensores de corrente, filtro, varistores, relés, *trimpots* e uma fonte comutada integrada.

CONCLUSÃO

Embora possa ser considerada de arquitetura simples, ainda há pouca informação técnica disponível na literatura nacional, acerca de adaptadores de carga que acompanham os veículos elétricos. A documentação que acompanha o manual de usuário é bastante simplificada. O tema de veículos elétricos é multidisciplinar, sendo de suma importância que profissionais técnicos especializados e de distintas áreas, especialmente de mecânica, possam ter acesso a informações técnicas resumidas, mas especialmente voltadas à área elétrica. O proposito

deste trabalho foi de aproveitar a oportunidade oferecida pela disponibilização de um veículo elétrico sinistrado para estudos no ECPC-VC. O adaptador de carga que acompanhou o veículo despertou uma certa curiosidade, sendo escolhido para esta abordagem. Diagramas e informações, principalmente específicas sobre este dispositivo, além de esparsas, são raras. O conteúdo abordado buscou um detalhamento e uma representação na forma de blocos dos dispositivos envolvidos, com o objetivo de proporcionar um entendimento básico de sua operação e funções. A disponibilidade permitiu abrir o equipamento para uma inspeção visual fotográfica interna. Foi possível constatar na prática a localização de comutadores de função internos do dispositivo, relatados apenas em fóruns da internet, e a localização de apenas um componente elétrico resistivo somente nos terminais do conector. O entendimento da operação destes adaptadores de corrente alternada, parte da identificação do seu conector adaptado ao veículo. Foi apresentada também, uma pequena revisão de algumas tecnologias que envolvem a operação deste carregador.

AGRADECIMENTO

O grupo agradece o apoio dos organizadores do RENOMAT e em especial ao Prof. Lírio Schaeffer, e também ao proprietário do veículo Johnatan Bortolotto e seu pai Valderino, pelo incentivo às iniciativas.

Referências

[1] ZHIDA. Manual do Adaptador de Carga. 1ª ed. [S.l.]: Zhida, [data de publicação].

[2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR IEC 60529:2017 - Graus de proteção providos por invólucros (Código IP). Rio de Janeiro, 2017

[3] EV Charging Connector Types Worldwide - https://www.renhotecev.com/blog/ev-charging-connector-types-worldwide.html

[4] SAE J1772 – Electric Vehicle and Plug-in Hybrid Electric Vehicle Conductive Charge Coupler.

[5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR IEC 62196-1:2021. Plugues, tomadas, tomadas móveis para veículos elétricos e plugues fixos para veículos elétricos – Recarga condutiva para veículos elétricos – Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

[6] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR IEC 62196-2:2021. Plugues, tomadas, tomadas móveis para veículos elétricos e plugues fixos para veículos elétricos – Recarga condutiva para veículos elétricos – Parte 2: Requisitos dimensionais de compatibilidade e de intercambiabilidade para os acessórios com pinos e contatos tubulares em corrente alternada. 2. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

[7] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT).. NBR IEC 62196-3: Veículos elétricos - Recarga condutiva para veículos elétricos - Parte 3: Requisitos dimensionais de compatibilidade e de intercambiabilidade para acessórios com pinos e contatos tubulares CA e CC. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

[8] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT).. GB/T 20234.2-2011: Conectores para veículos elétricos - Parte 2: Requisitos de segurança e intercâmbio para conectores para conexão CA e CC de contato de pinos e aberturas. Rio de Janeiro, 2011.

[9] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT GB/T 20234.2-2011: Conexões para carregamento de veículos elétricos. Parte 2: Conectores e sistemas de acoplamento. Requisitos de segurança. Pequim, China: Administração de Padronização da China, 2011.

[10] (2025) SITE: BESEN RFID - https://www.besen-group.com/what-is-rfid-on-ev-chargers/

[11] (2025) SITE: ST Microelectronics - https://www.st.com/en/applications/energy-generation-and-distribution/ev-charging-ac-and-dc-wallbox-charger.html

[12] ZHANG X., Analysis and Testing of U.S.-China Key Technology for Charging Interoperability of Electric Vehicles , IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021

44º SENAFOR

28th International Forging Conference
13th International Sheet Metal Forming Conference / 10th BrDDRG Congress
13th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies – Brazil/RS
2nd International Conference on Innovation in Materials and Manufacturing
Hotel Plaza São Rafael – P. Alegre RS, October 1-3, 2025

IMPORTÂNCIA DA ANEXAÇÃO DA ESPÉCIE VEÍCULO DIDÁTICO À CLASSIFICAÇÃO DO ARTIGO 96 DO CÓDIGO DE TRÂNSITO BRASILEIRO

Jorge Pimentel de Morais - Autor [1]
Carlos Eduardo Bizarro Rambo - Autor [2]
Lucas Melo Machado - Autor [3]
Marçal Rodrigues Pires - Orientador [4]
Vicente Mariano Canalli - Orientador [5]

RESUMO

Neste artigo é descrito inicialmente o conceito de veículo didático e a sua importância no cenário automotivo brasileiro. Estes veículos permitem levar adiante projetos e pesquisa de dispositivos tanto mecânicos como elétricos e eletrônicos. No caso dos veículos elétricos didáticos, estes podem ser auxiliares no teste e desenvolvimento econômico de baterias e também na proposição e configuração de diferentes arquiteturas de acionamento. Efetivamente são em testes práticos que o aprendizado é fomentado e consolidado e onde muitos entraves a resolver são evidenciados.

Palavras Chave — Veículo Elétrico, Código de Transito Brasileiro, Veículo Didático, Artigo 96 do CTB

[1] Mechanical Engineer, CNPq - Energy and Gas Application Group, Brazil
[2] Electrical Engineer Master, CNPq - Energy and Gas Application Group, Brazil
[3] Materials Master's Student -, Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul, Brazil
[4] Professor Doctor Engineer - Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul, Brazil.
[5] Doctor Engineer - SSRC-VC – Space for Science, Research and Culture V. Canali, Brazil.

Dentre outras possibilidades está o ensaio de imersão de veículos em água, com a bateria conectada e sistemas energizados, com o objetivo de detectar a dinâmica do processo de danos. Essa linha de pesquisa pode desenvolver conhecimento na avaliação de danos aos veículos envolvidos nas enchentes de maio de 2024, no Rio Grande do Sul – Brasil. Ainda, o conceito de veículo de circulação restrita, que se trata do seu uso em percursos limitados, visando os testes apropriados. Embora o desenvolvimento tecnológico seja enorme, muitos usuários, especialmente os de baixo poder econômico, sentem a falta de propostas de arquiteturas simples e econômicas no mercado que visem o essencial, que é o deslocamento sem a tradicional dependência tecnológica e oneração no preço final dos veículos. Adicionalmente, não haveria impedimentos para se desenvolver arquiteturas mais complicadas e onerosas. Além das barreiras técnicas destaca-se a importância necessidade de adaptação da legislação. Inclui-se, os benefícios e de que forma o CTB – Código de Trânsito Brasileiro poderia contribuir com as iniciativas de pesquisa e testes mediante a anexação desta espécie de veículo no artigo 96.

IMPORTANCE OF ATTACHING THE TYPE OF EDUCATIONAL VEHICLE TO THE CLASSIFICATION OF ARTICLE 96 OF THE BRAZILIAN TRAFFIC CODE

Jorge Pimentel de Morais - Author [1]
Carlos Eduardo Bizarro Rambo - Author [2]
Lucas Melo Machado - Author [3]
Marçal Rodrigues Pires - Adviser [4]
Vicente Mariano Canalli - Adviser [5]

ABSTRACT

This article initially describes the concept of educational vehicles and their importance in the Brazilian automotive landscape. These vehicles allow us to carry out projects and research into both mechanical and electrical and electronic devices. Educational electric vehicles can be used in the testing and cost-effective development of batteries, as well as in the proposal and configuration of different drive architectures. Practical testing is where learning is fostered and consolidated, and where many obstacles to be overcome are highlighted. Among other possibilities is the immersion test of vehicles in water, with the battery connected and systems energized, to detect the dynamics of the damage process. This line of research can develop knowledge in assessing damage to vehicles involved in the May 2024 floods in Rio Grande do Sul, Brazil. Furthermore, the concept of restricted-circulation vehicles, which involves their use on limited routes, is being explored for relevant testing. Although technological development is enormous, many users, especially those with low economic income,

feel the lack of simple and economical architectures on the market that focus on the essential: travel without the traditional dependence on technology and burden on the final vehicle price. Furthermore, there would be no impediments to developing more complicated and costly architectures. In addition to technical barriers, the need to adapt legislation is important. This includes the benefits and how the Brazilian Traffic Code (CTB) could contribute to research and testing initiatives by including this type of vehicle in Article 96.

1. INTRODUÇÃO

As grandes montadoras focam na produção em grande escala, não incluindo os nichos, denominados de veículos dedicados. Projetos educacionais baseados em veículos didáticos permitem a vivência de processos de pesquisa, desenvolvimento e inovação. A construção e análise de protótipos, mesmo em escala reduzida, proporcionam experiências que desenvolvem autonomia, capacidade crítica e resolução de problemas nos estudantes [1].

O aprendizado baseado em veículos didáticos permite que estudantes compreendam os desafios técnicos da mobilidade elétrica, como a eficiência energética, a gestão térmica e a integração com redes inteligentes. Dessa forma, o ensino ultrapassa a teoria, promovendo experiências reais em laboratório [2]. Os veículos didáticos, podem ser auxiliares no teste e desenvolvimento econômico de baterias e também na proposição e configuração de diferentes arquiteturas de acionamento, especialmente no âmbito dos veículos dedicados.

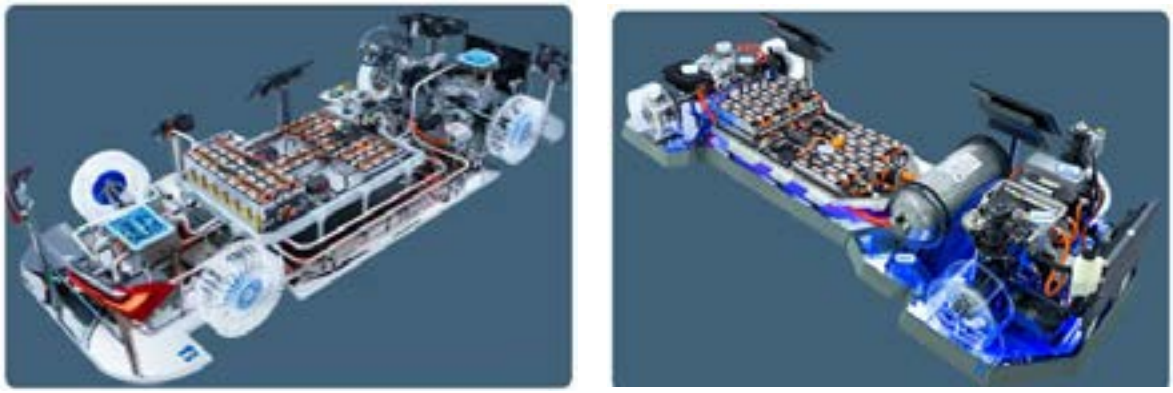
Um aspecto relevante é a conexão entre veículos didáticos e a infraestrutura de carregamento. Trabalhar com protótipos em laboratório possibilita compreender os impactos das estratégias de recarga rápida, bidirecionalidade e integração com energias renováveis [3]. O desenvolvimento de veículos elétricos inclui diversos aspectos técnicos, como a melhoria da autonomia recarga e redução de custos. Além de favorecer a aprendizagem técnica, veículos didáticos também contribuem para a conscientização ambiental. Estes permitem relacionar diretamente a redução de emissões e o uso de fontes renováveis ao cotidiano dos alunos, reforçando o papel transformador da educação na transição energética [2].

Um fator crucial a ser considerado é a segurança, motivo pelo qual um veículo didático não pode ser definido de maneira simplória como um brinquedo educativo. Países em desenvolvimento tem se limitado a adquirir novas tecnologias de forma passiva, sem o seu real domínio. Nestes países pontos nevrálgicos como a manutenção por pessoal técnico capacitado e a garantia de segurança são relegados a segundo plano. Assim define-se veículo didático, como similar ao veículo experimental utilizado pelas montadoras. Este veículo seria considerado uma ferramenta de aprendizado e desenvolvimento de forma segura, da área automotiva por profissionais técnicos habilitados da área de ensino e pesquisa. A ideia é motivar grupos multidisciplinares de profissionais, no desenvolvimento de veículos dedicados que cumpram o objetivo de atender as necessidades e limitações de usuários destes países. Cabe ressaltar que um dos grandes limitadores das novas tecnologias está na manutenção que torna os veículos descartáveis pela falta de conhecimento indo em contra a sustentabilidade. Parcerias técnicas são passíveis de formar unindo competências técnicas do ramo da Engenharia como Eletrônica Digital e de Potência, Instrumentação, Controle e Automação, Conversão Eletromecânica de Energia, Acionamento Elétrico, Mecânica, Tecnologia de Materiais e de Energias Renováveis que desta forma são integradas e desenvolvidas. Tecnologias mais simples e mais focadas a aplicação podem resolver os problemas de aplicação e custos enfrentados por um usuário comum, sem onerar o preço pago pelo meio ambiente. Iniciativas pioneiras no mundo envolvem veículos educacionais ou didáticos da Beifang International Enrollment Trainment [4], como ilustrado na figura 1. Estes veículos desafiam os alunos a estudar, construir, ensaiar **e até mesmo dirigir** um veículo elétrico como um projeto educacional. Esta proposta antecipa uma estratégia fundamental na área dos veículos elétricos voltada a manutenção presencial da bateria, motor e sistemas de controle de um veículo elétrico, usando veículos elétricos educacionais vistos na figura 1. Em

alguns casos os veículos apresentam cortes na carroceria para facilitar a visualização de seus componentes.

Figura 1: Curso de reparo e manutenção de bateria/motor/controle de veículos elétricos [4]

Outros modelos são concebidos em plataformas transparentes de veículos comerciais como o BYD Qin, visto na figura 2(a) que é uma família de sedãs compactos e médios produzidos pela BYD Auto desde 2012, disponível em versões híbridas plug-in (PHEV), elétricas a bateria (BEV) e, anteriormente, com motor a combustão interna (ICE). O modelo mais recente, BYD Qin L, foi lançado na China em 2024 e está sendo avaliado para o mercado brasileiro. Veículos experimentais a hidrogênio também são disponíveis em plataformas transparentes



(a)BYD Qin (b)veículo experimental a hidrogênio

Figura 2: Veículos educacionais transparentes [4]

Segundo Switch Lab seus veículos didáticos são uma ferramenta de desenvolvimento de força tarefa para educadores ensinarem fundamentos práticos de veículos elétricos. Projetado com uma abordagem independente de componentes, prepara os alunos para carreiras em tecnologias de veículos elétricos. O Switch Lab EV DC 72v [5], visto na figura 3(a) é um veículo elétrico totalmente funcional que capacita os alunos a construir, conectar e solucionar problemas de um veículo elétrico enquanto praticam procedimentos de segurança de baixa e alta tensão. O Switch Lab EV PM/96v [6], da figura 3(b) é um veículo elétrico totalmente funcional que capacita os alunos a construir, conectar, diagnosticar e programar um veículo elétrico enquanto praticam procedimentos de segurança nos circuitos de de baixa e alta tensão. Um projeto de alto impacto que desafia os alunos a construir, testar e dirigir um veículo elétrico como um projeto educacional. Projetado com uma abordagem independente de componentes, este veículo educacional, prepara os alunos para carreiras em tecnologias de veículos elétricos. Desde já, para o caso de veículos homologados, registrados e licenciados,

até então em circulação em vias públicas, e que se encontram *na condição de apreendido*, bem como com *gravame de irrecuperável,* essa nova classificação a ser inclusa no Artigo 96 do Código de Trânsito Brasileiro [7] permite que tenham uma nova *aplicação,* conforme prevê o Artigo 97.

(a) switch-lab-ev-dc-72v (b) switch-lab-ev-pm-96v

Figura 3: Veículos educacionais transparentes [5]

Segundo o Art. 97, as características dos veículos, suas especificações básicas, configuração e condições essenciais para registro, licenciamento e circulação serão estabelecidas pelo CONTRAN, em função de suas aplicações.
Nesta nova classificação, os veículos licenciados, apreendidos e irrecuperáveis *não teriam liberada a sua circulação em vias públicas*.

2. VEÍCULOS ELÉTRICOS DIDÁTICOS EM DESENVOLVIMENTO NO ECPC-VC

O ECPC-VC – Espaço de Ciência Pesquisa e Cultura Vicente Canali tem desenvolvido e agregado protótipos didáticos em seus estudos.

A *tricicleta* elétrica [8], vista na figura 4, tem como objetivo ser um utilitário simples e econômico para o deslocamento especialmente em áreas litorâneas. Este veículo elétrico derivado de uma bicicleta, dispõe de um espaço disponível para a carga de mercadorias e inclui a propulsão com pedal assistido com um motor de baixa potência. Este protótipo agrega conhecimento acerca de motores *in wheel* na propulsão dianteira.

(a)veículo (b) dados da placa de identificação

Figura 4: Tricicleta elétrica ECPC-VC

Os ciclomotores elétricos convencionais necessitam de um certificado de registro. Todavia um ciclomotor elétrico pode ser concebido a partir da adaptação de um motor elétrico e de um acionamento em um ciclomotor convencional com o visualizado na figura 5 [9].

Neste desenvolvimento a um custo muito baixo é possível aprimorar competências técnicas relacionadas a este tipo de veículo, de maior potência que a tricicleta e com propulsão via motor *in whell* na roda traseira..

(a)veículo (b) dados da placa de identificação

Figura 5: Ciclomotor elétrico ECPC-VC

O *quadriciclo*, disponível no ECPC-VC e apresentado na figura 6 [10], [11]., tem sido uma alternativa para desenvolvimento, beneficiada pela legislação brasileira.

(a)veículo (b) dados da placa de identificação

Figura 6: *Quadriciclo* elétrico ECPC-VC

Considerado mais seguro do que um veículo de duas ou três rodas o *quadriciclo* implementado permite o deslocamento confortável de duas pessoas, utilizando um motor de corrente continua.

Os custos envolvidos no desenvolvimento ou aquisição de veículos elétricos de maior porte são elevados e muitas vezes não proporcionam o grau de análise oferecido pela acessibilidade aos sistemas em um veículo mais simples.

Outro desenvolvimento didático do ECPC-VC trata-se da adaptação de um bugui, visto na figura 7 [12], veículo típico das regiões litorâneas, com carroceria *fiberglass*, para um veículo elétrico e didático. A ideia é que este veículo pode ser uma alternativa customizada viável, econômica, segura e ambientalmente correta, de fácil manutenção para o deslocamento em regiões de topografia plana.

Este veículo é equipado com um motor de indução trifásico de baixa potência e um inversor, conferindo simplicidade e robustez ao acionamento.

Alguns componentes, como o pedal de aceleração foram desenvolvidas a partir de adaptações realizadas em componentes automotivos disponíveis no mercado.

(a)veículo (b) dados da placa de identificação

Figura 7: Veículo típico para circulação no litoral ECPC-VC

Com uma potência inferior ao bugui da figura 7, o veículo PUMA GTS visto na figura 8 [13], que utiliza tradicionalmente um motor Volkswagem a combustão é um veículo icônico, equipado originalmente com carroceria *fiberglass.* A menor potência empregada no motor elétrico adaptado ao veículo, permite o deslocamento utilizando uma redução mais apurada. Assim a velocidade é reduzida em detrimento ao torque utilizando-se a pequena potência para o seu deslocamento. Neste protótipo pode ser estudado o acionamento elétrico e o efeito das leis da Física e da Mecânica, conferindo um sentimento de cunho experimental ao desenvolvedor. Além de promover o estudo presencial, fundamental na área de formação técnica, o protótipo didático incorpora painéis solares flexíveis. A utilização de energia solar renovável permite a carga das baterias tanto com o veículo estacionado na origem e destino, quanto acrescentando energia ao deslocamento.

(a)veículo (b) dados da placa de identificação

Figura 8: Puma GTS equipado com inversor e painéis solares ECPC-VC

É importante citar que especialmente o desenvolvimento de veículos dedicados [2], ao deslocamento em determinado trecho pode introduzir variáveis de projeto que permitem otimizar o custo e benefício ao veículo. Esta concepção traz através de seus desenvolvimentos específicos um vasto campo de trabalho aos profissionais de Engenharia e da área técnica e científica. Destaca-se especialmente os benefícios que isto pode trazer a sociedade e ao meio ambiente. O desenvolvimento de veículos dedicados (conceito de veículo de circulação restrita) tem em conta considerar um equilíbrio e coerência, entre a aplicação e as exigências em uma determinada tecnologia. Também seguindo as linhas similares foi desenvolvida a arquitetura ilustrativa de um veículo elétrico a hidrogênio, visto na figura 9 [14].

(a)arquitetura típica (b)placa de identificação

Figura 8: Veículo elétrico com tecnologia do hidrogênio ECPC-VC

3. ARTIGO 96 DO CTB - CÓDIGO DE TRÂNSITO BRASILEIRO

No capítulo IX – dos veículos - Seção I - Disposições Gerais do Art. 96, os veículos são classificados quanto à categoria no item III como:

a) oficial;

b) de representação diplomática, de repartições consulares de carreira ou organismos internacionais acreditados junto ao Governo brasileiro;

c) particular;

d) de aluguel;

e) de aprendizagem.

A alteração sugerida estaria no item III do Artigo 96 do CTB [7] seria acrescentada a categoria *f)* d*idático.* Por sua vez é importante alertar que o Artigo 97 cita o conceito dos *veículos e suas aplicações*.

4. IMPORTÂNCIA DA ANEXAÇÃO DA ESPÉCIE VEÍCULO DIDÁTICO NO ARTIGO 96

A introdução do conceito de *veículo didático* traz inúmeros benefícios relacionados ao desenvolvimento e conhecimento de elementos conceituais envolvidos na complexa engenharia automotiva, especialmente nos atuais patamares tecnológicos de intensa eletrônica embarcada, incluindo até mesmo os *veículos conectados*. Os recentes eventos extremos trouxeram uma nova demanda, quando milhares de veículos ficaram submersos por longos períodos, em águas contaminadas, trazendo muitas incertezas quanto ao seu perfeito reuso. Ensaios utilizando *veículos didáticos* com suas baterias conectadas, e seus sistemas energizados, colocados em uma piscina, podem simular a dinâmica dos danos causados pela presença da água. Esse ensaio pode ser muito útil no sentido da produção de conhecimento sobre a possível recuperação de alguns sistemas.

CONCLUSÃO

De forma similar ao veículo experimental de alto custo utilizado pelas montadoras, o veículo didático de baixo custo seria considerado uma ferramenta de aprendizado e desenvolvimento seguro, da área automotiva, uma vez desenvolvido por profissionais técnicos habilitados na área de ensino e pesquisa. Os grandes entraves verificados na atualidade, como dificuldade de manutenção, custo e conhecimento acerca dos veículos elétricos poderiam ser enfrentados com o desenvolvimento e utilização de tais veículos. Estes veículos poderiam ser projetados de maneira dedicada para uma utilização especifica, incrementado a

sua eficiência e reduzindo custos. Justifica-se desta forma também, uma interface amigável entre os veículos dedicados de baixa e as energias renováveis como a solar. As áreas técnicas como a Engenharia se ressentem cada vez mais da experimentação e do ensino presencial. O Engenheiro sempre se caracterizou como um desenvolvedor prático de engenhocas. Os veículos elétricos didáticos têm potencial para desenvolver com vantagens e de forma econômica, presencial e experimental a área da Engenharia Automotiva, em países em desenvolvimento como o Brasil. As iniciativas com veículos didáticos, podem partir de pequenas adaptações similares as que estão sendo desenvolvidas no ECPC-VC

AGRADECIMENTO

O grupo agradece o apoio dos organizadores do RENOMAT e em especial ao Prof. Lírio Schaeffer, pelo incentivo às iniciativas.

Referências

[1] CHAU, K. T. et al. Translation of Electric Vehicle Research into Education. World Electric Vehicle Journal 2025, Vol. 16, Page 327, v. 16, n. 6, p. 327, 13 jun. 2025.

[2] ARAVENA, C.; DENNY, E. The impact of learning and short-term experience on preferences for electric vehicles. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 152, p. 111656, 1 dez. 2021.

[3] QIU, Dawei *et al.* Reinforcement learning for electric vehicle applications in power systems:A critical review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 173, p. 113052, 1 mar. 2023.

[4] (2025) SITE: BEIFANG – International Enrollment Training - https://zs.beifangedu.com/

[5] (2025) SITE: SWITCH LAB EV https://theswitchlab.com/programs/the-switch-lab-ev-dc-72v/

[6] (2025) SITE: SWITCH LAB EV - https://theswitchlab.com/programs/the-switch-lab-ev-pm-96v/

[7] BRASIL. Lei nº 9.503, de 23 de setembro de 1997. Institui o Código de Trânsito Brasileiro. Brasília, DF, 1997.

[8] CANALLI V.M., Projeto Guarda-Chuva de Veículos Elétricos – *Triicicleta* Elétrica, IC PUCRS

[9] CABRAL E.D., DE MORAIS J.P., KOENIG M., MACHADO L.M., PIRES M.R., CANALLI V.M., Implementação de um Protótipo didático de um ciclomotor elétrico, RENOMAT 13th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies, 2024

[10] ALENCASTRO, J., Aplicação de pulsador em veículo elétrico, Trabalho de Conclusão de Curso, 2006. - Graduação em Engenharia de Controle e Automação - Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, 2006

[11] PICCINI R., DE LIMA J.C.M., CANALLI, V.M, - Protótipo para aquisição de dados de conjugado mecânico de um chassis, 12th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies – Brazil RS

[12] CANALLI V.M., Projeto Guarda-Chuva de Veículos Elétricos - Veículos Elétricos Viáveis, IC PUCRS

[13] CANALLI V.M., Projeto Guarda-Chuva de Veículos Elétricos - Veículos de 1CV, IC PUCRS

[14] LUCENA J.E., DE MORAIS J.P., CABRAL E.D., MACHADO L.M., PIRES M.R., CANALLI V.M., Protótipo didático de um quadriciclo a hidrogênio, RENOMAT 13th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies, 2024

44º SENAFOR

28th International Forging Conference
13th International Sheet Metal Forming Conference / 10thBrDDRG Congress
13th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies – Brazil/RS
2ndInternational Conference on Innovation in Materials and Manufacturing
Hotel Plaza São Rafael – P. Alegre RS, October 1-3, 2025

LACUNAS LEGISLATIVAS E NORMATIVAS DA AVALIAÇÃO DOS DANOS CAUSADOS À VEÍCULOS AUTOMOTORES EXPOSTOS POR LONGO PERÍODO DE TEMPO À ÁGUAS CONTAMINADAS

Jorge Pimentel de Morais - Autor [1]
Carlos Eduardo Bizarro Rambo - Autor [2]
Lucas Melo Machado - Autor [3]
Adriene Sampaio Pereira - Orientadora[4]
Marçal Rodrigues Pires - Orientador [5]
Vicente Mariano Canalli - Orientador [6]

RESUMO

Neste artigo são apresentados aspectos relacionados à exposição prolongada de veículos automotores expostos por um longo período a águas contaminadas em enchentes. As resoluções CONTRAN 810/2020 e 851/2021 - Dispõe sobre a classificação de danos e os procedimentos para a regularização, a transferência e a baixa dos veículos envolvidos em acidentes [8]. Alertando que no Relatório de Avarias para a Classificação de Danos em Veículos Sinistrados, na sua tabela de avaliação, não se encontra nenhum critério de avaliação para as condições de veículos submersos em águas de enchentes.

Palavras Chave - Veículo Elétrico, Veículo sinistrado, Lacunas legislativas, Lacunas normativas, Exposição de veículos automotores a águas contaminadas

[1] Mechanical Engineer, CNPq - Energy and Gas Application Group, Brazil
[2] Electrical Engineering Master - CNPq Energy and Gas Application Group, Brazil
[3] Materials Master's Student - Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul, Brazil
[4] Doctoral Engineer - CNPq Energy and Gas Application Group, Brazil
[5] Professor Doctor Engineer - Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul, Brazil.
[6] Doctor Engineer-SSRC-VC - Space for Science, Research and Culture V. Canali, Brazil.

O caso se agrava, por ocasião da avaliação de veículos elétricos, especialmente devido a seus sistemas de alta tensão, cuja manipulação exige profissionais que ainda não estão efetivamente habilitados para tal. Assim sendo, verifica-se uma Lacuna Legislativa, que está provocando transtornos aos proprietários de veículos vítimas das enchentes. Por outro lado, uma Lacuna Normativa, ocorre na Inspeção de veículos automotores recuperados de sinistros, uma vez que os veículos devem estar funcionando. Para todos os tipos de veículos submersos, peças e componentes podem estar sendo comercializados, gerando a pior situação de segurança, que é a *falha intermitente*.

LEGISLATIVE AND REGULATORY GAPS IN THE ASSESSMENT OF DAMAGES CAUSED TO MOTOR VEHICLES EXPOSED FOR LONG PERIODS OF TIME TO CONTAMINATED WATER

Jorge Pimentel de Morais - Author[1]
Carlos Eduardo Bizarro Rambo- Author[2]
Lucas Melo Machado - Author[3]
Adriene Sampaio Pereira Adviser[4]
Marçal Rodrigues Pires - Adviser[5]
Vicente Mariano Canalli - Adviser[6]

ABSTRACT

This article presents aspects related to the prolonged exposure of motor vehicles to contaminated floodwaters. CONTRAN Resolutions 810/2020 and 851/2021 establish damage classification and procedures for regularizing, transferring, and writing off vehicles involved in accidents. It is important to note that the Damage Report for Classifying Damage to Accidented Vehicles, in its evaluation table, does not include any assessment criteria for the conditions of vehicles submerged in floodwaters. The situation is exacerbated when it comes to evaluating electric vehicles, especially due to their high-voltage systems, which require professionals who are not yet fully qualified to operate. Therefore, there is a legislative gap that is causing problems for owners of vehicles affected by flooding. On the other hand, a regulatory gap exists in the inspection of motor vehicles recovered from accidents, as these vehicles must be operational. For all types of submerged vehicles, parts and components may be being sold, creating the worst safety situation: intermittent failure.

1. INTRODUÇÃO

Existe uma preocupante lacuna legislativa, tendo em vista a ausência do devido tratamento de veículos sinistrados em enchentes, em especial os elétricos em que sistemas de tensões elevadas, poderão estar submetidos a manipulação por profissionais sem uma formação adequada, o que tem causado problemas aos proprietários de veículos vítimas das

enchentes e também riscos potenciais aos reparadores destes veículos. Ainda, os riscos de falhas intermitentes causadas pela comercialização peças e componentes comprometidos.

Em contrapartida, cria-se uma Lacuna Normativa pois de acordo com as normas do INMETRO, (Regulamentos Técnicos da Qualidade – RTQs), [1], o veículo a ser inspecionado deve estar em funcionamento.

Por outro lado, todos os entraves técnicos e procedimentos relacionados a fatores químico-biológicos da contaminação, bem como a necessidade de formação para o processo de reparação, são omitidos.

2. ENCHENTES E TEOR DAS ÁGUAS CONTAMINADAS

Até o momento da elaboração deste trabalho não haviam informações disponíveis, relacionadas às análises das águas, bem como a sua georreferencia. Supõe-se que vários Órgãos e Instituições, como o Instituto de Pesquisas Hidráulicas – UFRGS [4], bem como o DMAE – Departamento Municipal de Água e Esgotos e seus semelhantes, da região metropolitana de Porto Alegre - RS estejam realizando as análises.

Independente das análises, para quem presenciou o evento, os odores provenientes das áreas inundadas eram indescritíveis, tanto pela sua intensidade, como a sensação que causava, fazendo com que o tempo de exposição suportado fosse muito curto. Muitos diziam ser *o cheiro da morte.* Os relatos da imprensa diziam sobre a presença de agentes químicos e biológicos, que podem interagir no longo tempo de contato, através da deposição de uma camada de lama de cor marrom intenso, provocando efeitos que ainda estariam em andamento.

Para uma análise técnica dos efeitos da enchente, dados importantes deveriam ser flexibilizados como:

a) Análise das águas e seus agentes químicos e biológicos
b) Localização das coletas
c) Cotas dos locais das coletas
d) Tempo de ocorrência da inundação

Nas águas de enchentes é possível detectar a presença de várias doenças de transmissão hídrica, onde a água atua como veículo do agente infeccioso. As doenças de transmissão hídrica podem ser ocasionadas por: bactérias (como febre tifoide, disenteria bacilar, cólera), protozoários (amebíase), vermes e larvas (esquistossomose) e vírus (hepatite infecciosa e poliomielite), além de doenças de origem hídrica decorrentes de certas substâncias contidas na água em teor inadequado (contaminantes tóxicos). São contaminantes emergentes, agrotóxicos, produtos farmacêuticos e metais como chumbo, cromo e mercúrio.

O quadro 1 apresenta algumas impurezas na água e seus efeitos.

IMPUREZA	ESTADO	EFEITOS
Areia	suspensão	Turbidez
Silte	suspensão	Turbidez
Argila	suspensão	Turbidez
Bactéria	suspensão	Doenças e prejuízo às instalações
Microrganismos	suspensão	Turbidez, cheiro e cor
Resíduos industriais	suspensão	Poluição
Resíduos domésticos	suspensão	Poluição
Corantes vegetais	coloidal	Cor, sabor e acidez
Silica	coloidal	Turbidez
Bicarbonato de cálcio e magnésio	dissolvido	Alcalinidade e dureza
Sulfatos de cálcio e magnésio	dissolvido	Dureza e corrosividade em caldeiras
Ferro	dissolvido	Sabor, cor
Oxigênio	dissolvido	Corrosividade
Dióxido de carbono	dissolvido	Corrosividade, acidez

Quadro 1: Efeitos de impureza na água

2.1. Agentes químicos

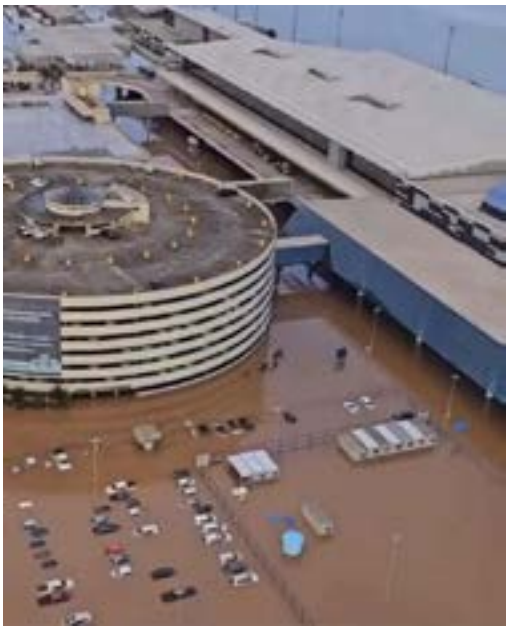
Os agentes que provocam corrosão oxidação e zinabre são representados principalmente por sais, metais pesados e resíduos industriais

2.2. Agentes biológicos

Os principais agentes biológicos presentes na água contaminada são microorganismos, fungos bactérias especialmente a *Leptospira* que é transmitida principalmente pela urina de animais infectados, especialmente roedores, que causa a Leptospirose. Também se encontra bactérias coliformes como a Escherichia coli. Assim um simples contato com as peças dos veículos, mesmo bem depois de ocorrido o sinistro, pode levar a necessidade de tratamento com antibióticos e anti-inflamatórios. Os sintomas vão desde dor até manchas expostas na pele.

2.3. Deposições

Pela turbidez constatada visualmente, se verifica a presença de lama como ilustram as fotografias da figura 1, que envolveram veículos estacionados no aeroporto e também em concessionárias da cidade de Porto Alegre.



(a)Aeroporto Salgado Filho

(b)Concessionária BYD

Figura 1: Turbidez que atesta a presença de lama nas águas contaminadas [2] e [7].

3. INFORMAÇÕES DE GARANTIA EM KIT DE ELETRIFICAÇÃO E VEÍCULO ELÉTRICO

Como as informações sobre os efeitos destas águas ainda estão indisponíveis, as raras informações existentes dizem respeito apenas à exposição temporária à águas pluviais ou de rios, por um período máximo de trinta minutos.
Já os Manuais do Proprietário falam em *uso indevido,* os casos da exposição a lama ou areia de praia, bem como a linha d'água não ultrapassar a borda inferior do veículo.
O Grupo de Pesquisas em Energia e Aplicação de Gases – CNPq teve acesso à um veículo da marca BYD, modelo Dolphin, que ficou exposto às águas e que foi leiloado de forma contrária à Lei. O veículo foi totalmente desmontado, seguindo as normas de segurança, em especial aos agentes contaminantes, bem como a bateria. O resultado surpreendeu, pela

intensidade dos danos aos componentes eletrônicos. Neste caso, o Manual do Proprietário fala em *fator de proteção,* sem citar a Norma Técnica utilizada.
Em kits de controladores comercializados para o acionamento de bicicletas [4], e especialmente no termo de garantia costumam se destacar comentários bastante restritivos. No caso dos motores *brushless in whell* é descrito que os mesmos são indicados para uso urbano ou estradas de terra que não envolvam praia ou barro a ponto de atolar e sobre aquecer o motor. No que diz respeito ao ambiente de praia, se referem a que nenhum componente do kit foi projetado para este tipo de uso. A utilização pode causar o travamento de peças internas ou a oxidação dos componentes internos provocando falhas de operação e desgaste prematuro de peças. Todos estes fatores não são caracterizados como dentro da garantia, por se tratar de uso indevido.
A nível de veículos comerciais [5], as informações estão presentes no Manual e em Guias de Usuário. Advertem que após o veículo passar por trecho de alagamento, seus componentes como o conjunto do motor elétrico e transmissão, sistemas de tração e sistemas elétricos podem ser seriamente danificados. A inobservância de tais precauções possibilitará a ocorrência de danos no veículo ou falhas que não serão cobertas pela garantia.
Componentes de alta-tensão são dispositivos eletrônicos. Depois que algum componente de alta-tensão for imerso em água, a evaporação total da umidade não pode ser garantida mediante a secagem ao sol ou ao ar.
Ao entrar água nos componentes de alta-tensão, seu isolamento será bastante afetado; ao mesmo tempo há muitas substâncias condutoras na água, que podem causar curto-circuito nos componentes ou no sistema de alta-tensão. Neste caso, a segurança e o desempenho de serviço do veículo serão muito afetados.
A entrada de água em qualquer componente de alta-tensão tem um grande impacto no desempenho do produto, como classificação IP e tensão suportada, causando um grande risco à segurança. Se algum componente de alta-tensão for imerso em água após seu uso é necessário contatar imediatamente uma concessionária autorizada.
Precauções são indicadas por ocasião da entrada na água, cujo nível não deve exceder a borda inferior do veículo em áreas inundadas. Caso seja necessário atravessar uma área alagada a recomendação é desligar o ar condicionado e manter a aceleração constante, atravessando lentamente o trecho.

4. NIVEIS DE CLASSES DE PROTEÇÃO IP DE ACORDO COM A NORMA IEC60529

Níveis de classes de proteção IP ou grau de proteção IP são padrões internacionais definidos pela norma IEC 60529, [6] para classificar e avaliar o grau de proteção de produtos eletrônicos fornecidos contra intrusão (partes do corpo como mãos e dedos), poeira, contato acidental e água.
Ao analisar a placa de identificação do controlador de um veículo elétrica comercial, verifica-se que o seu grau de proteção é IP 67, conforme ilustra a figura 2(a).

(a) dados do controlador (b)placa de dados da bateria principal

Figura 2: BYD Dolphin elétrico

A proteção IP67 indica que um dispositivo é totalmente protegido contra poeira e também resistente à imersão em água até um metro de profundidade por até trintaminutos. Isso

significa que dispositivos com essa classificação podem sobreviver a respingos, chuva leve e até mesmo a um breve mergulho em água, mas não são adequados para uso prolongado em ambientes aquáticos profundos. Interessante verificar que este grau não está definido em um componente crucial que é a bateria principal, conforme a figura 2(b). Portanto, as cotas atingidas nos alagamentos podem ser de fundamental importância na análise dos danos provocados. Conforme a figura 3, existem referencias as profundidades em mapa [7], disponibilizado pelo IPH Instituto de Pesquisas Hidrológicas da UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Figura 3: Mapa para simular a profundidade das águas na enchente de 2024.

5. EXPOSIÇÃO PROLONGADA DE VEÍCULOS ELÉTRICOS À GUAS CONTAMINADAS

Por ocasião das enchentes de maio de 2024, ocorridas no Rio Grande do Sul, e com base nos resultados que ainda estão sendo conhecidos, a Avaliação dos danos causados à veículos automotores expostos por longo período de tempo à águas contaminadas não está contemplada na legislação vigente.

Na figura 4 é possível observar alguns efeitos verificados em componentes eletroeletrônicos de um veículo elétrico sinistrado, que teve partes submersas durante as enchentes de 2024 no Rio Grande do Sul.

(a)Placa de comando (b)Tampa de conectores (c)Conector caixa de fusíveis (d)Conector bateria auxiliar (e)Bateria auxiliar

Figura 4: Componentes de um veículo elétrico sinistrado na enchente.

6. LACUNAS LEGISLATIVAS NA AVALIAÇÃO DE DANOS EM VEÍCULOS

Sobre o cumprimento dos Requisitos Legais pertinentes, no caso, as Resoluções CONTRAN [8], 810/2020 e 851/202 - Dispõe sobre a classificação de danos e os procedimentos para a regularização, a transferência e a baixa de veículos envolvidos em acidentes, (hoje identificados por Veículos Sinistrados). No Relatório de Avarias para a Classificação de Danos em Veículos Sinistrados, na sua Tabela de Avaliação identificada no quadro 2 deste artigo, não está contemplada a condição de Veículos Expostos à águas de enchentes, deixando de existir o Critério de Avaliação.

RELATÓRIO DE AVARIAS PARA CLASSIFICAÇÃO DE DANOS EM VEÍCULOS SINISTRADOS		
Veículo:	Placa:	Data:
Agente Responsável:	Matrícula:	Nº BAT:
AUTOMÓVEIS, CAMIONETAS, CAMINHONETES E UTILITÁRIOS, COM ESTRUTURA EM MONOBLOCO		
COMPONENTES, PEÇAS ESTRUTURAIS/SEGURANÇA PASSIVA AVARIADAS NO ACIDENTE		

AVALIAÇÃO		DANO			AVALIAÇÃO		DANO		
ITEM	Descrição da peça ou componente	SIM	NÃO	NA	ITEM	Descrição da peça ou componente	SIM	NÃO	NA
1	Painel corta-fogo				12	Longarina traseira esquerda			
2	Longarina dianteira esquerda				13	Assoalho porta malas ou caçamba			
3	Caixa de roda dianteira esquerda				14	Longarina traseira direita			
4	Estrutura da soleira esquerda				15	Caixa de roda traseira direita			
5	Air Bags Frontais				16	Estrutura da coluna traseira direita			
6	Air Bags Laterais				17	Estrutura da soleira direita			
7	Estrutura da coluna dianteira esquerda				18	Estrutura da coluna central direita			
8	Estrutura da coluna central esquerda				19	Estrutura da coluna dianteira direita			
9	Estrutura da coluna traseira esquerda				20	Assoalho central direito			
10	Caixa de roda traseira esquerda				21	Caixa de roda dianteira direita			
11	Assoalho central esquerdo				22	Longarina dianteira direita			

Quadro 2: Avarias para classificação de danos em veículos sinistrados

Então, a partir da avaliação destes itens é realizada a avaliação de danos conforme o quadro 3

	TOTAL GERAL (SIM+NA):			
Observações:				
AVALIAÇÃO DO DANO				
Quantidade de peças estruturais/seg. pass. danificadas de 0 a 1	DANO DE PEQUENA MONTA OU SEM DANO			
Quantidade de peças estruturais/seg. pass. danificadas de 2 a 6	DANO DE MÉDIA MONTA			
Quantidade de peças estruturais/seg. pass. danificadas maior que 6	DANO DE GRANDE MONTA			

Quadro 3: Avaliação de danos em veículos sinistrados

Os itens10,12,16, 18 e 19 da Tabela de Avarias do quadro **2** não são mostrados na figura 5, porém correspondem aos itens 15,14,9,4,8 e 7 no lado oposto do representado no desenho.
As anotações possíveis do vistoriador são:
a) SIM – quando o item for danificado no acidente
b) NÃO – quando o item não for danificado no acidente
c) NA – quando não for possível avaliar o dano, devendo ser justificado

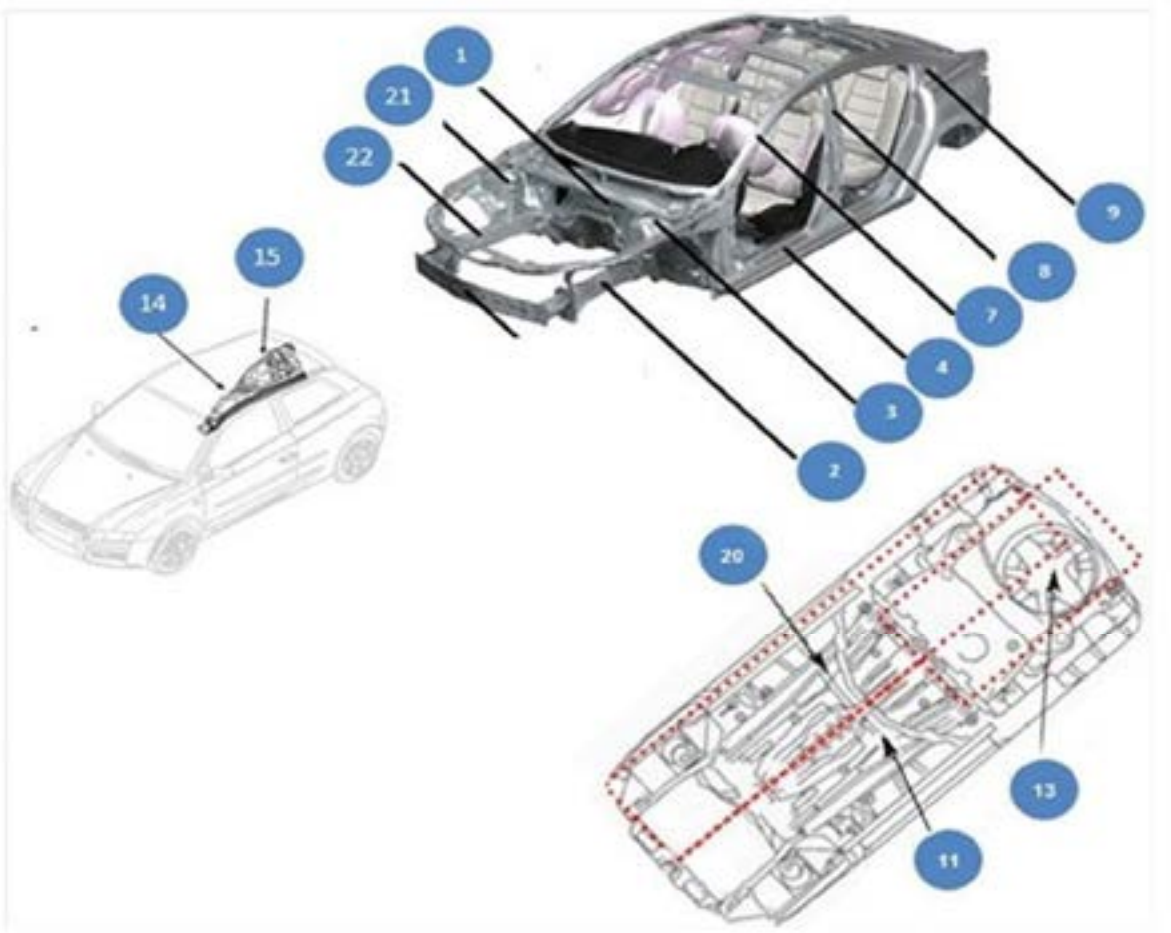


Figura 5: Desenho para localização dos danos no veículo.

Sobre o cumprimento dos Requisitos Normativos, no caso, os Regulamentos Técnicos da Qualidade (RTQs) – INMETRO, na sua Portaria 32, de janeiro de 2004, no seu Artigo 1°, fala da *Inspeção de Veículos Automotores – Recuperados de Sinistros*. Para a realização deste procedimento é exigido que o veículo esteja em funcionamento, o que não é o caso em discussão, e assim, o cumprimento do requisito normativo é inaplicável.
Em seu Item 7.4 Inspeção em pista, e seus Subitens: 7.4.1; 7.4.2; 7.4.3; 7.4.4; 7.4.5; e 7.4.6, todos envolvem o veículo andando e em funcionamento, avaliando os sistemas de freios, suspensão, direção, etc.
Ainda sobre os Requisitos Normativos, certamente não foram feitos ensaios de imersão de veículos em água, *com a bateria conectada e todos os sistemas energizados*, como aconteceu nos veículos sinistrados por enchentes.
A nível mundial, temos os exemplos do Estado da Flórida – USA – que devido à sua topografia é o local onde se tem o maior número de veículos submersos em águas (*flooded vehicles*) [11], [14], [15], e se conhece o fenômeno do *termal runaway,* que é o aquecimento da bateria de veículos elétricos expostos à agua salgada [12]. Ainda sobre os Estados Unidos, as questões relacionadas à *identificação dos veículos inundados*, por ocasião da venda dos mesmos, no sentido de impedir que a restrição administrativa (gravame) seja omitida do registro dos mesmos [13], [16] **e [17].**
O DETRAN/RS publicou a Portaria n° 184/2024 em 27 de maio de 2024, [16] para autorizar, em caráter emergencial, os procedimentos acessórios de transferência, em virtude dos prejuízos causados pela catástrofe natural que foi a enchente, considerando o reconhecimento da calamidade pública, a indisponibilidade de acesso a sistemas, perda de documentos e a disposição das seguradoras em simplificar a indenização e transferência dos

veículos com o objetivo de retomada da economia e incremento dos valores às famílias atingidas.
Importante salientar que esta Portaria permite a transferência dos veículos sinistrados na enchente de 2024 para as Seguradoras, mas não fala sobre A AVALIAÇÃO DOS DANOS. Ocorre que os veículos foram INDEVIDAMENTE LEILOADOS, mesmo sem cumprir o que determina a Resolução CONTRAN 810/2020.
Considerando que a fabricação de veículos automotores envolve as mais variadas tecnologias, patamares tecnológicos, bem como processos de fabricação, o ponto de partida dessa busca por solução, passa pelos fabricantes, que buscando preservar interesses e segredos industriais limitam a informação na forma de diagramas e programação, especialmente nos veículos elétricos.
Sem dúvidas, o único meio de destravar a questão é a criação de uma Legislação onde se regulamente a forma da disponibilização das informações técnicas necessárias à elaboração dos procedimentos operacionais de avaliação e possível recuperação desses veículos.
Como ponto de partida, as várias ocorrências de eventos extremos no estado de São Paulo, onde seguidamente se presencia veículos submersos, esses fatos já devem ter provocado um aprendizado, que uma vez disponibilizado, seria útil para o caso da enchente de maio de 2024, no Rio Grande do Sul.

7. DO ANACRONISMO E DA INAPLICABILIDADE DOS REQUISITOS LEGAIS

A Resolução CONTRAN 810/2020 trata:
Art. 1º Esta Resolução dispõe sobre a classificação de danos e os procedimentos para a regularização, a transferência e a baixa dos veículos envolvidos em acidentes.
§ 1º Para fins desta Resolução, considera-se veículo sinistrado todo aquele envolvido em ocorrência de acidente de trânsito, dano ou qualquer outro evento que ocasione avaria em uma ou mais partes do veículo.
Já no inciso primeiro do Artigo primeiro, define o espectro de abrangência do quê é considerado um veículo sinistrado, falando em danos ou qualquer outro evento que ocasione avaria em uma ou mais partes do veículo. Aqui justamente reside uma grande lacuna, pois quando fala em *qualquer avaria,* deveria fazer constar em seu *Relatório de Avarias*, os vários itens de alto custo e grande importância que compõem os veículos atuais, especialmente os sistemas eletroeletrônicos que são comprometidos por ocasião dos eventos em análise.
Por outro lado, na questão da *aplicabilidade da Lei*, o Artigo segundo fala:
Art. 2º O veículo envolvido em acidente deve ser avaliado pela autoridade de trânsito ou seu agente, na esfera das suas competências estabelecidas pelo CTB, e ter seu dano classificado conforme estabelecido nesta Resolução.
Ora, por ocasião do atendimento da ocorrência de trânsito, a autoridade de trânsito ou seu agente não tem condições de avaliar os níveis de danos em complexos sistemas eletroeletrônicos, mesmo porque seu acesso exige a sua desmontagem e teste em bancadas específicas.
Concluindo o item, resta evidenciado o anacronismo da Lei, bem como a sua inaplicabilidade.

8. SUGESTÃO DE PARÂMETROS TÉCNICOS NA AVALIAÇÃO DE DANOS

A seguir são sugeridos parâmetros técnicos importantes para a avaliação de danos:

a) Fator de Proteção: Item decisivo na proteção de sistemas elétricos e eletrônicos, o fator de proteção envolve altos custos de produção, e assim, pode ter sua execução fragilizada.

b) Linha d'água: O nível atingido pela inundação define a gravidade dos danos, e seu ponto crítico é o contato das águas com os processadores eletrônicos.

c) Localização de componentes críticos: A cota em relação ao solo, da localização de sistemas eletrônicos, define as dimensões dos danos.

d)Tipo de veículo: Veículos leves tipo sedans e hatchs tem pouca altura em relação ao solo, enquanto SUVs, camionetas, camionetes, VANs, e caminhões estão menos suscetíveis, em função da linha d'água.

e) Cota de inundação: Até então, esse elemento conceitual era utilizado por instituições especializadas, como as Defesas Civis. Após o evento de maio de 2024, no Rio Grande do Sul – Brasil, muitas pessoas passaram a utilizar a cota como definição de localização de residências, comércios e industrias, onde os imóveis dessas localizações perderam muito valor venal.

f) Tipo de água: Conforme o tipo de água a que os veículos foram submetidos, aumenta o nível de gravidade dos danos, como por exemplo, na bateria de um veículo elétrico submerso em água salgada, ocorre um fenômeno chamado *termal runaway,* que é o aquecimento provocado pela perda dos isolamentos, chegando até ao fogo [12].

g) Tempo de exposição: Esse item tem muita relevância, é o que exige o maior tempo de pesquisas, tendo em vista ainda não ter sido objeto de pesquisa científica, e suas informações estão restritas aos segredos industriais.

9. GRAVAMES EXISTENTES NOS REGISTROS DOS VEÍCULOS SINISTRADOS

Diante do Código de Trânsito Brasileiro, o gravame em um veículo é um registro que indica uma restrição administrativa ou uma obrigação financeira associada a ele, como um financiamento ou outra dívida. Essa restrição impede a transferência do veículo para outro proprietário sem a autorização do credor.

No caso deste trabalho, o gravame é uma restrição imposta por ocasião do cumprimento dos requisitos estabelecidos no Código de Trânsito Brasileiro - Capítulo IX – Seção II: Da Segurança dos Veículos:

Art. 103. O veículo só poderá transitar pela via quando atendidos os requisitos e condições de segurança estabelecidos neste Código e em normas do CONTRAN.

Em diversos países, em especial no estado da Flórida (USA), os órgãos de trânsito registram de forma incisiva [16], [17], informações sobre os sinistros aos quais um veículo esteve envolvido. Uma das formas de fraudes é a da venda de veículos em outras localidades, para omitir os registros de danos.

Conforme evidenciado nos Itens 6 e 7 deste trabalho – Lacunas Legislativas na Avaliação de Danos em Veículos**,** onde os veículos sinistrados por inundações estão incluídos na categoria de *danos de grande monta,* e assim na condição de *irrecuperáveis.*

10. CONDIÇÃO LEGAL DOS VEÍCULOS SINISTRADOS

Interpretando os incisos terceiro e quarto do artigo terceiro da Resolução 810 de 15 de dezembro de 2020:

§ 3º Quando, em virtude de circunstâncias excepcionais, a autoridade de trânsito ou seu agente não conseguirem verificar se um componente do veículo foi danificado no acidente, esse componente deve ser assinalado na coluna não avaliado ("NA") do respectivo "Relatório de Avarias" e sua pontuação deve ser considerada no cômputo geral da avaliação do veículo, justificando-se no campo "observações" do relatório as razões pela qual ele não pôde ser avaliado.

§ 4º Em atendimento ao § 2º do art. 1º do CTB, para efeito de segurança no trânsito, um componente assinalado como não avaliado ("NA") deve ser considerado como danificado e computado na avaliação geral do veículo.

A conjugação na aplicação destes dois dispositivos Legais leva facilmente ao enquadramento de Danos de Grande Monta, cujo significado torna o veículo irrecuperável.

11. A ATUAL SITUAÇÃO DOS VEÍCULOS SINISTRADOS

Até o final da elaboração deste trabalho, não se teve retorno das solicitações de informações sobre a atual situação dos veículos sinistrados no evento de maio de 2024, no Rio Grande do Sul, Brasil.

CONCLUSÃO

Este trabalho aborda um tema pouco frequente na literatura, mas que afetou inúmeras pessoas por ocasião dos sinistros verificados nas enchentes no Rio Grande do Sul em 2024. Analisando um veículo elétrico comercial, foi possível documentar alguns efeitos ocorridos por ocasião da submersão parcial do mesmoem águas contaminadas da enchente. Foi verificado que uma das principais consequências foi a deposição de resíduos de teor orgânico e também biológicos e químicos. Os contatos e partes metálicas foram grandemente afetados pela oxidação e zinabre especialmente em terminais e conectores. Os efeitos vão desde a incidência de mau contato quanto a sua destruição e quebra devido ao efeito da corrosão. Os manuais de garantia de veículos e kits de eletrificação de bicicletas se eximem dos efeitos das águas e resíduos demonstrando uma certa fragilidade e limitações severas da eletromobilidade. Há recomendações de consulta imediata as concessionárias que ao que parece ainda enfrentam séria dificuldade na manutenção de tais veículos. As informações de grau de proteção nem sempre se encontram nas placas de componentes cruciais do acionamento, como por exemplo, a bateria principal. De toda forma a partir da análise do grau de proteção informado é possível ter uma ideia das limitações enfrentadas por veículos elétricos, ao serem sinistrados nas enchentes. Por outro lado, quando se fala no cumprimento dos requisitos legais e normativos, em ambos os casos inexiste o devido tratamento, sendo urgente e necessária uma atualização ou criação destes requisitos a fim de contemplar o sinistro de veículos em enchentes e garantir, com segurança, a correta classificação dos veículos sem prejudicar ou onerar o cidadão.

AGRADECIMENTO

O grupo agradece o apoio dos organizadores do RENOMAT e em especial ao Prof. Lírio Schaeffer, pelo incentivo às iniciativas.

Referências

[1] INMETRO - Regulamentos Técnicos da Qualidade (RTQs) – Portaria 32, janeiro de 2004

[2] Jornal da Universidade, UFRGS, ISSN 2966-4675, IPH coleta amostras do Guaíba para detectar a presença de patógnos e de resíduos químicos e físicos na água da enchente, maio de 2024.

[3] SITE (2025): CARROS E CARANGAS - https://carrosecarangas.com.br/mais-de-300-concessionarias-foram-afetadas-pelas-enchentes-no-rio-grande-do-sul-o-que-representa-42-do-total-das-lojas-em-atividade-no-estado/

[4] FITZ – Controladores para bicicleta com motor na roda, 2024

[5] BYD – Manual do usuário, 2024

[6] ABNT - NBR IEC 60529, Graus de proteção providos por invólucros (código IP), 2017.

[7] TSCHLEDER A., LALPELT L., Mapa de Profundidades Máximas Prováveis para a Cheia de 2024, IPH UFRGS, 2024.

[8] SITE (2025): RESOLUÇÃO CONTRAN 810 - https://www.in.gov.br/web/dou/-/resolucao-contran-n-810-de-15-de-dezembr o -de-2020-296167311

[9] SITE (2025): FLOODED VEHICLES FLORIDA DEPARTMENT OF HIGWAY SAFETY AND MOTORS VEHICLES - https://www.bing.com/search?pglt=2339&q=%3A+Flooded+Vehicles+-+Florida+Department+of+Highway+Safety+and+Motor+Vehicles&cvid=9b881c838f6 e4f228c739cf5e7217bf2&gslcrp =EgRlZGdlKgYIABBFGDkyBggAEEUYOTIGCAEQRRg8MgcIAhDrBxhA0gEINTE5M2owajGoAgiwAgE&FORM=ANNTA1&DAF1=1&PC=HCTS

[10] SITE (2025): HOW MANI VEHICLES ARE REPORTED FLOODED REARLY - https://www.bing .com /search?pglt=2339&q=how+many+vehicles+are+reported+flooded+yearly+-+Pesquisar&cvid=8f3368fb808346f499a6d6d004a3b284&gs_lcrp=EgRlZGdlKgYIABBFGDkyBggAEEUYOTIHCAEQ6wcYQNIBCTExMTcxajBqMagCCLACAQ&FORM=ANNTA1&DAF1=1&PC=HCTS

[11] - SITE (2025): FLOOD CAR DATABASE - https://www.bing.com/search?q=Flood+Car+ Data base+%7C+My+Florida+Legal&gs_lcrp=EgRlZGdlKgYIABBFGDsyBggAEEUYOzIGC AEQABhAMgYIAhAAGEAyBggDEAAYQDIGCAQQABhAMgYIBRAAGEAyBggGEAAYQDIGCAcQABhAMgcICBDrBxhA0gEIMjk2N2owajGoAgiwAgE&FORM=ANAB01&DAF1=1&PC = HCTS

[12] SITE (2025): HURRICANE HELENE ELECTRIC VEHICLES FIRE FLOODING - https://apnews.com/article/ hurricane-helene-electric-vehicles-fire-flooding-0284e2eb2accc0570361def4e 963eda0

[13] SITE (2025): CITIZENS SERVICES – MY FLORIDA LEGAL - https://www.bing.com/search? Pglt=2339&q=Citizens+Services+%7C+My+Florida+Legal&cvid=5a1b37068eb14e40aae34d332428cfff &gs_lcrp=EgRlZGdlKgYIABBFGDkyBggAEEUYOTIGCAEQABhAMgYIAhAAGEAyBggDEAAYQDIGCAQQABhAMgYIBRAAGEAyBggGEAAYQDIGCAcQABhAMgcICBDrBxhA0gEIMjM5M2owajGoAgiwAgE&FORM=ANNT A 1&DAF1=1&PC=HCTS

[14] SITE (2025): FLORIDA HAS MOOST FLOOD DAMAGES VEHICLES - https://www.bing.com /search?pglt=2339&q=Flood+damaged+cars+are+being+sold+across+US.+How+to+protect+yourself&cvid=0f2f429d8336404595c2f699f0412837&gs_lcrp=EgRlZGdlKgYIABBFGDsyBggAEEUYOzIHCAEQ6wcYQNIBCDE5MDZqMGoxqAIIsAIB&FORM=ANNTA1&DAF1=1&PC=HCTS

[15] SITE (2025): FLORIDA HAS MOOST FLOOD DAMAGES VEHICLES - https://www.bin g. com/search?pglt=2339&q=Florida+has+most+flood-damaged+vehicles+in+US%2C+study+say s.+How+to+tell+before+you+buy&cvid=3e4658c1194f43a4a8d1f718b513bbc7&gslcrp=EgRlZGdlKgYIABBFGDsyBg gAEEUYOzIHCAEQ6wcYQNIBCDI1MzhqMGoxqAIIsAIB&FORM=ANNTA1&DAF1=1&PC=HCTS

[16] PORTARIA DETRAN/RS N° 184/2024, publicada no D.O. em 27 de maio de 2024.

44º SENAFOR

28th International Forging Conference
13th International Sheet Metal Forming Conference / 10th BrDDRG Congress
13th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies – Brazil/RS
2nd International Conference on Innovation in Materials and Manufacturing
Hotel Plaza São Rafael – P. Alegre RS, October 1-3, 2025

LACUNA LEGISLATIVA RELACIONADA À TRICILETA ELÉTRICA COM PEDAL ASSISTIDO DE ATÉ 350W

Jorge Pimentel de Morais - Autor [1]
Carlos Eduardo Bizarro Rambo - Autor [2]
Lucas Melo Machado - Autor [3]
Marçal Rodrigues Pires - Orientador [4]
Vicente Mariano Canalli - Orientador [5]

RESUMO

As bicicletas elétricas são os veículos mais simples de ser montados. As potências baixas utilizadas em seu acionamento envolvem menores custos, e uma compatibilidade direta com o emprego de energias renováveis. Veículos movidos à eletricidade, que não dependem de outros tipos de combustíveis, representam o futuro da *eletromobilidade urbana*. Neste artigo, de forma estratégica, é conceitualizada a *tricicleta elétrica*, tratando-se de um tipo de veículo simples e barato que pode auxiliar muito na entrega de cargas leves e na mobilidade urbana. Atualmente quem desenvolve um veículo simples deste tipo se sente efetivamente desamparado pelas leis, especialmente pela falta de uma legislação especifica e distinta daquela que é proposta para os triciclos.

Palavras Chave — Veículo Elétrico, Tricicleta elétrica, Pedal assistido, Lacuna legislativa

[1] Mechanical Engineer, CNPq Energy and Gas Application Group, Brazil
[2] Electrical Engineering Master, CNPq Energy and Gas Application Group, Brazil
[3] Materials Master's Student -, Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul, Brazil
[4] Professor Doctor Engineer - Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul, Brazil.
[5] Doctor Engineer - SSRC-VC – Space for Science, Research and Culture V. Canali, Brazil.

Pretende-se através deste artigo, sensibilizar legisladores do município, estado e união para o fomento deste tipo de transporte e o desenvolvimento de acessórios necessários para a legalização simplificada desta bicicleta de três rodas. Neste caso é sugerida a adaptação de um pedal assistido e a limitação da potência do acionamento elétrico até 350W, incluindo também acessórios convencionais de veículos automotores típico e sistemas de sinalização. Outro aspecto importante é o de conscientizar os Órgãos Municipais de Trânsito das cidades brasileiras quanto à importância do fornecimento da placa com duas letras e três números, sugerida para as carroças, auxiliando a legalizar o veículo abordado neste estudo para a circulação. Também não menos importante é o objetivo de fomentar a implementação de uma metodologia desburocratizada para que este tipo de veículo possa ser construído por profissionais habilitados e posteriormente legalizado para circulação, de forma que o mesmo possa atender de forma segura pequenos serviços de entrega, especialmente em regiões planas como o litoral.

LEGISLATIVE GAP RELATED TO ELECTRIC TRICYCLET WITH PEDAL ASSISTED POWER OF UP TO 350W

Jorge Pimentel de Morais - Author [1]
Lucas Melo Machado - Author [2]
Marçal Rodrigues Pires - Adviser [3]
Vicente Mariano Canalli - Adviser [4]

ABSTRACT

Electric bicycles are the simplest vehicles to assemble. Their low power outputs result in lower costs and are directly compatible with renewable energy sources. Electric-powered vehicles, which don't rely on other fuels, represent the future of urban electromobility. This article strategically conceptualizes the electric tricycle as a simple and inexpensive vehicle that can significantly aid in the delivery of light loads and urban mobility. Currently, anyone developing a simple vehicle of this type feels effectively hampered by the law, especially the lack of specific legislation distinct from that proposed for tricycles. The aim of this article is to raise awareness among municipal, state, and federal legislators about the promotion of this type of transportation and the development of accessories necessary for the simplified legalization of this three-wheeled bicycle. In this case, the suggestion is to adapt a pedal-assist system and limit the power of the electric drive to 350W, also including conventional accessories from typical motor vehicles and signaling systems. Another important aspect is to raise awareness among Municipal Traffic Agencies in Brazilian cities about the importance of providing the two-letter, three-number license plate suggested for carts, helping to legalize the vehicle discussed in this study for circulation. Equally important is the objective of encouraging the implementation of a streamlined methodology so that this type of vehicle can be built by qualified professionals and subsequently legalized for circulation, enabling it to safely serve small delivery services, especially in flat regions such as the coast.

1. INTRODUÇÃO

Como, as bicicletas são veículos de duas rodas, acredita-se ser plausível conceitualizar a *tricicleta,* vista na figura 1, disponibilizada comercialmente e muito utilizada nas regiões litorâneas e por entregadores, como uma bicicleta de três rodas.

(a) Disponibilizada comercialmente (b) Adaptada para entregas

Figura 1: Bicicleta de três rodas ou *tricicleta*

Este é um tipo de veículo simples e barato que pode auxiliar muito na entrega de cargas leves e na mobilidade urbana. Certamente, o termo *tricicleta* é desconhecido por grande parte da população, sendo apenas citado nos casos de competições envolvendo para-atletas.

No caso dos veículos eletrificados a legislação vigente abrange apenas os ciclomotores, as bicicletas elétricas e os equipamentos de mobilidade individual autopropelidos.

Atualmente quem desenvolve um veículo simples na forma de uma *tricicleta elétrica* vista na figura 2(a), se sente efetivamente desamparado pelas leis, especialmente pela falta de uma legislação especifica e distinta daquela que é proposta para o *triciclo* visto na figura 2(b), que faz parte do grupo dos *ciclomotores*.

(a) *Tricicleta* elétrica [1] (b) *Triciclo* Elétrico ved 1000w [2]

Figura 2: *Diferença entre veículos eletrificados de três rodas*

Pretende-se através deste artigo, sensibilizar legisladores do município, estado e união para o fomento deste tipo de transporte e o *desenvolvimento de acessórios* necessários para a legalização simplificada desta bicicleta de três rodas, alguns deles vislumbrados na figura 2(a). Na Àsia estes veículos são muito comuns, como ilustra a figura 3.

(a) transporte de cargas e passageiros [3]

(a) transporte de cargas [4]

(a) transporte de passageiro [5]

Figura 3: Imagens da utilização da *tricicleta* na Ásia

3. PRINCIPAIS VANTAGENS DA TRICICLETA ELÉTRICA

A *tricicleta elétrica* proposta seria um veículo especialmente compatível com o deslocamento e entrega em regiões litorâneas ou de topografia plana e utilização de energias renováveis. Neste caso para tornar o veículo acessível à população de baixa renda é sugerida a adaptação de um pedal assistido e a limitação da potência do acionamento elétrico até 350W de forma similar ao que ocorre com as bicicletas elétricas.

Locais de grandes aglomerações urbanas, como os países asiáticos, as *tricicletas* assumem especial papel nos deslocamentos de pessoas e pequenas cargas, tendo em vista suas reduzidas dimensões, ocupando pouco espaço e facilitando o estacionamento.

Por outro lado, sob o ponto de vista da *eficiência energética,* a exemplo da bicicleta, a *tricicleta* tem um baixíssimo consumo de energia, podendo ter autonomia energética, através de um pequeno painel solar.

Certamente, é um belo exemplo de *sustentabilidade,* cumprindo os três pilares: social, ambiental e econômico.

Nas imagens de cidades asiáticas, da figura 3, tem-se a justificativa da aplicação deste tipo de veículo em grandes centros urbanos, onde se pode ver várias configurações de *tricicletas*.

Ainda no âmbito das justificativas, considerando a alta obesidade da população, um condutor com 100 kg, em uma bicicleta, teria a mesma energia cinética que um condutor de moto, magro. Sob o ponto de vista nas Leis da Física, ambos têm o mesmo potencial ofensivo, e portando, deveriam estar enquadrados na mesma legislação em vigor, exemplificando a similaridade entre as bicicletas e ciclomotores.

4. LIMITAÇÃO DE POTÊNCIA VIA DADOS NOMINAIS DO MOTOR

No veículo descrito existe a possibilidade de limitação de potência via programação, embora esta também possa ser feita por meio dos dados nominais do motor elétrico [6] :

a) Velocidade máxima nominal: É a velocidade até a qual o motor pode auxiliar. O motor elétrico tem uma velocidade nominal para dada potência. Por exemplo, utilizando uma aro 26 e com o motor TM3 a velocidade máxima nominal possível com o apoio do motor é de 32-33-34 km/h. Com o motor TA6 a velocidade é mais alta. O motor pode girar em velocidades mais altas, mas não vai auxiliar, por exemplo numa descida a alta velocidade.
b) Limite máximo de velocidade programada: Caso o painel seja programado com um limite de 25 km/h, o motor não irá auxiliar acima desta velocidade. Uma velocidade programada de 40km/h não terá efeito se a velocidade nominal do motor for menor.

5. CONTROLADOR COMERCIAL PARA O MOTOR BRUSHLESS DE 350W NA RODA

No acionamento do veículo com motor *brushless* na roda dianteira a ideia é utilizar um controlador visto na figura 3(a) e disponível no comércio com potência inferior a 350W, cujos dados nominais são apresentados na figura 3(b).

(a) controlador comercial

MODELO - KT36ZWSRD-XFC01F24	
POTÊNCIA	290W
TENSÃO NOMINAL	36Vcc
CORRENTE NOMINAL	8A
CORRENTE MÁXIMA	17A ± 1A
PROTEÇÃO CONTRA SUBTENSÃO	30Vcc ±0,5V
SINAL DE SENSOREAMENTO DE VELOCIDADE	1 – 4,2V
NÍVEL DO SINAL DE FRENAGEM	baixo

(b) dados nominais

Figura 3: Módulo do controlador do motor *brushless in wheel* [6]

O diagrama em blocos simplificado da figura 4 apresenta os periféricos adicionados ao controlador, que além do motor inclui um dispositivo essencial na legislação que é o PAS ou Pedal Assistido.

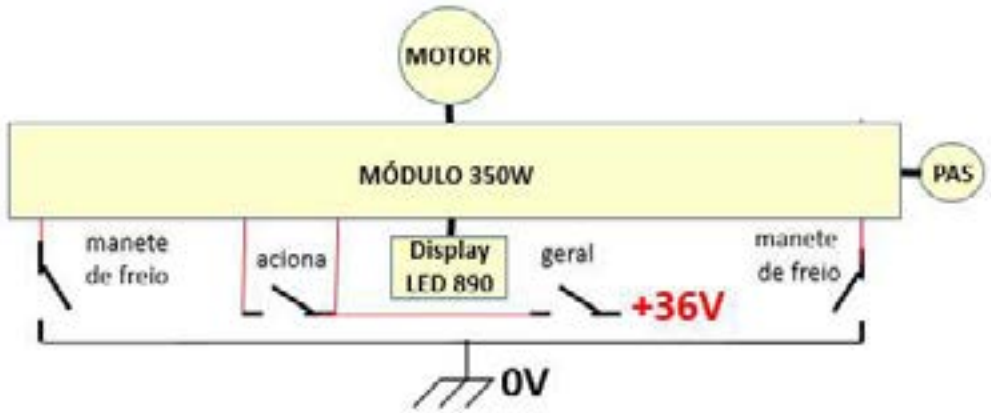
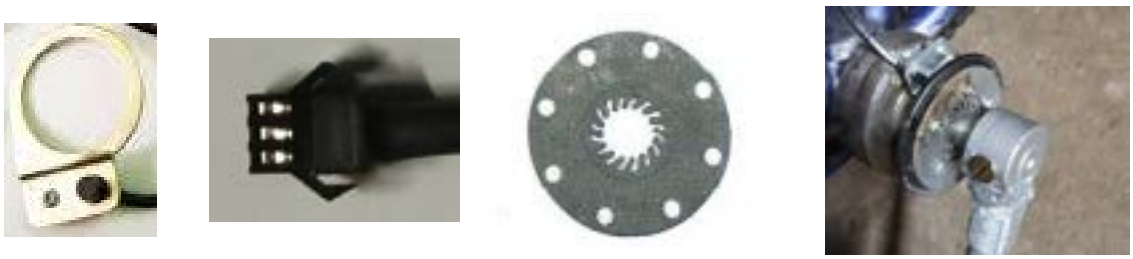


Figura 4: Diagrama de conexão simplificado do controlador do motor *brushless in wheel*

6. ASPECTOS TÉCNICOS IMPORTANTES RELACIONADOS AO PEDAL ASSISTIDO

O pedal assistido é composto por um anel com um sensor magnético e um conector vistos na figura 5(a) e 5(b) respectivamente, e um disco com ímãs do estilo da figura 5(c). Nas bicicletas mais simples como utilizada neste trabalho, é necessário fazer uma adaptação mecânica nos pedais. Esta adaptação já foi realizada em uma das bicicletas estudadas, sendo vista na figura 5(d)

6.1. Instalação do sensor e disco do sistema de pedal assistido



(a)anel sensor (b)conector (c) disco oito ímãs (d)instalação

Figura 5: Pedal assistido - PAS

6.2. Display dedicado ao acionamento e programação do sistema de pedal assistido

Legalmente a bicicleta que utiliza pedal assistido deve estar desprovida de acelerador manual. Neste caso é utilizado um display do tipo visto na figura 6(a), que emprega o conector da figura 6(b) compatível com o controlador.

(a) Display KT-LED890 (b) conector b) componentes do display

1	BOTÕES DE OPERAÇÃO	botão vermelho ON/OFF	4	LED INDICADOR	velocidade de caminhada 6km/h
2		botão verde MODE	5	DIAL INDICADOR DE VELOCIDADE	15 LEDs indicadores
3		botão azul 6 km/h	6	INDICADOR DA CAPACIDADE DA BATERIA	4 LEDs indicadores
RELAÇÃO POTÊNCIA REDUÇÃO			7	3 LED indicadores	

(c) funções de controle do display

Figura 6: Dispositivo para programação e controle de apoio do pedal assistido [7]

Os componentes do display compreendem botões de operação e programação e LEDs – *Light Emitter Diodes* que servem como indicadores de velocidade e capacidade da bateria, como sintetizado na figura 6. O indicador da capacidade da bateria, na verdade é relacionado a tensão da bateria. A tensão da bateria vai diminuindo na medida em que a bateria vai sendo descarregada. A bateria está carregada quando a tensão está acima de 40V e descarregada abaixo de 36V, porém devido a resistência interna da bateria a tensão diminui quando há uma demanda excessiva de corrente na arrancada ou nas subidas quando o motor anda mais devagar. Assim é normal que se apaguem um ou dois LEDs, ao arrancar ou subir uma ladeira, porém ao parar os LEDs voltam a indicar o estado normal da bateria

6.3. Programação do sistema de controle do pedal assistido

O fluxograma da figura 7 adaptado de [7] , apresenta de forma resumida o processo de programação das velocidades através do display, quando o PAS é utilizado.

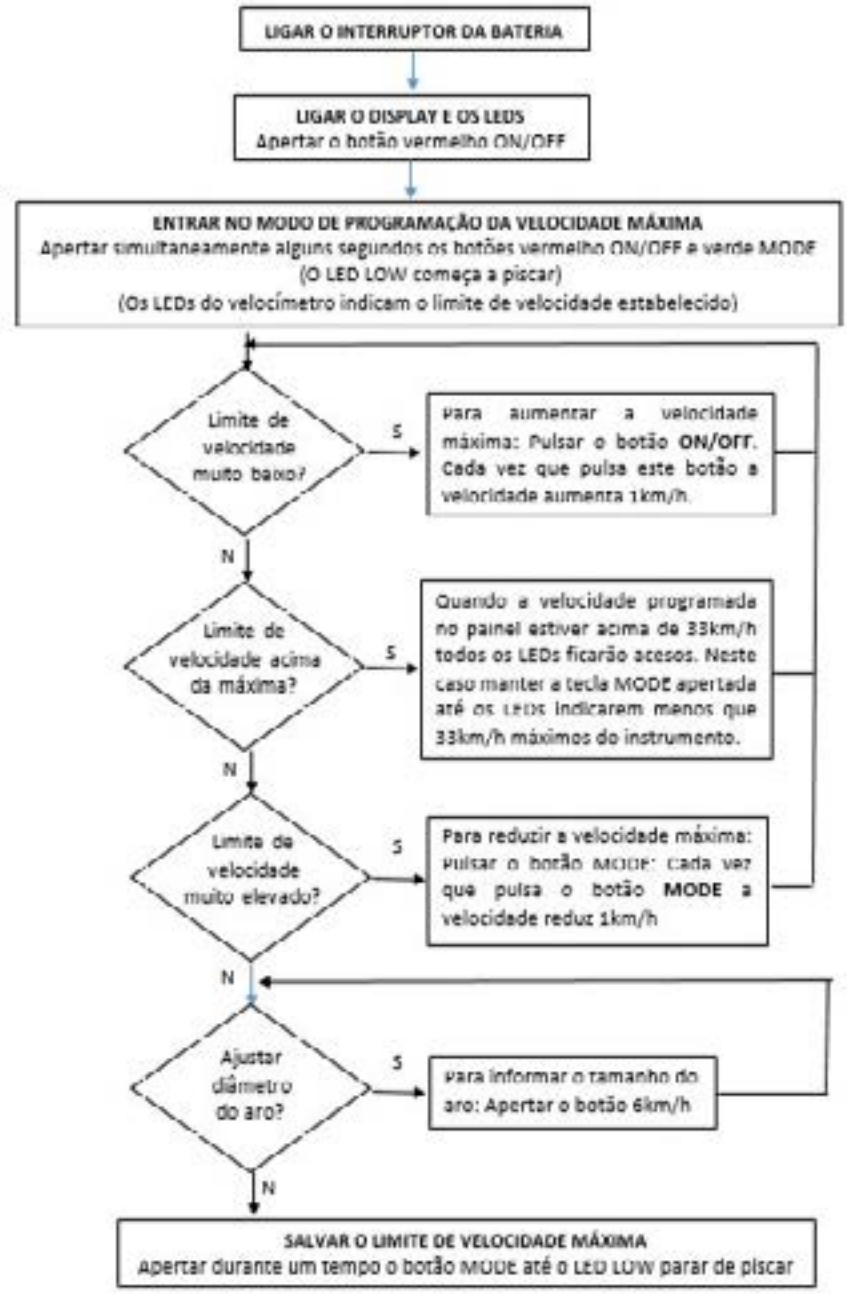


Figura 7: Diagrama de programação através do display do controlador

A implementação dessa metodologia permitiria que este tipo de veículo pudesse ser construído por profissionais habilitados e posteriormente legalizado de forma desburocratizada para circulação, uma vez que o fabricante garanta a potência máxima nominal do módulo comercializado. Trabalhos subsequentes, podem ter como proposta a implementação artesanal de um dinamômetro que permita confirmar que a potência aplicada na roda não irá ultrapassar o limite estabelecido pela legislação.

O ideal seria a posterior identificação do veículo através de uma placa, e a instalação de circuitos de iluminação e de sinalização para o trânsito, de forma que o mesmo possa atender de forma segura e legalizada pequenos deslocamentos e serviços de entrega ou até mesmo uma função dedicada tendo-se em vista um percurso definido a ser percorrido [8]

7. UTILIZAÇÃO E CONDUÇÃO VIA CONTROLE DE APOIO DO PEDAL ASSISTIDO

O sensor do pedal detecta a atividade do ciclista de forma ergonômica, ou seja de uma forma natural, não sendo necessário acionar controle algum, incrementado a segurança, garantindo que o ciclista se concentre no trânsito.
Com base no display da figura 6, o botão verde MODE do display, permite ajustar o controle de apoio LOW/MED/HIG do pedal assistido para:

a)Trajetos planos e com subidas leves em velocidades bem acima de 10km/h
É aconselhado usar nível 1 *LOW* (baixo) e 2 *MED* (médio) para andar no plano ou subidas leves com velocidades normais acima de 10km/h.

b)Trajetos menores que 500m e com subidas íngremes a velocidades acima de 10km/h
O nível 3 *HIGH* (alto) deve ser utilizado em subidas íngremes com velocidade acima de 10km/h.

c)Intervalo de arranque
No transitório de arranque não é aconselhado usar o nível HIGH.
É recomendado usar nível 1 LOW (baixo) ou 2 MED (médio) na hora de arrancar a bicicleta, para garantir a durabilidade e aumentar a durabilidade do motor e de todos os componentes elétricos do acionamento da bicicleta,

c) Trajetos maiores que 500m com subidas íngremes a velocidades abaixo de 10km/h
O nível 3 *HIGH* (alto) deve ser utilizado em subidas, mas não excessivamente íngremes ao ponto que não se consiga atingir 10km/h. O motor pode ser danificado por aquecimento excessivo, caso opere muito tempo em velocidade reduzida menor que 10km/h em trajetos superiores a 500m. Este dano não é coberto pela garantia e pode ser detectado facilmente na assistência técnica. Para evitar este problema recomenda-se reduzir o apoio para MED após ter percorrido os 500m com potência máxima a uma velocidade menor que 10km/h.

e) Conduzir andando ao lado da bicicleta sem precisar empurrar a uma velocidade de 6km/h
Apertando o botão azul do display de controle, durante 2 segundos o motor começa a andar devagar, para andar ao lado sem empurrar a bicicleta

f) Manutenção da inércia mediante acionamento da manete de freio
Ao acionar a manete de freio levemente e sem frear, a corrente do motor é bloqueada, mantendo a inércia o que se torna interessante em algumas situações de trânsito

g) Efeitos da trajetória e arranque da bicicleta no indicador de capacidade da bateria
São previsíveis efeitos da trajetória e do arranque no indicador de capacidade da bateria. Tendo em vista a resistência interna das baterias, um incremento da corrente provoca na queda de tensão de alimentação, o que afeta o indicador de capacidade.

8. OPÇÕES PARA IDENTIFICAÇÃO NA ELETROMOBILIDADE DE BAIXA POTÊNCIA

Conforme já comentado um dos pontos importantes para a circulação segura destes veículos, além da habilitação do condutor, seria a identificação do pequeno veículo, preferencialmente incluindo as características do seu acionamento. Estes dados poderiam ir desde a simples identificação do veículo até dados mais genéricos envolvendo parâmetros de potência, velocidade e legislação vigente. Placas para identificação de veículos rurais vem já de iniciativas antigas como ilustrado na figura 9(a) em Cangussú, um município localizado na no estado do Rio Grande do Sul. Emissões deste tipo de placa já ocorreram também há muitos anos em municípios como Uberlândia no estado de Minas Gerais, conforme a figura 9(b) Na figura 9(c) é proposta uma sugestão para placa de identificação de um veículo didático, que adicionalmente poderia incluir identificação da legislação, potência e velocidade máxima do veículo

(a)Cangussú – RS [9] (b)Uberlândia – MG [10] (c) sugestão ECPC-VC

Figura 9: Exemplos de iniciativas e sugestão de placa de veículo didático

9. A LACUNA LEGISLATIVA NA APLICABILIDADE DO VEÍCULO

Como ponto de partida é importante enfatizar o tratamento que o Legislador deu às bicicletas, através da Lei 9.503/97, de 23 de setembro de 1997 – Institui o Código de Trânsito Brasileiro [13], no seu Anexo I – Dos conceitos e definições: quando em sua definição, deixa claro o Código de Trânsito Brasileiro não ser aplicável. Considera-se *bicicleta* o veículo de propulsão humana, dotado de duas rodas, não sendo para efeito deste código similar à motocicleta, motoneta ou ciclomotor. Assim sendo, a legislação vigente abrange apenas os ciclomotores, as bicicletas elétricas e os equipamentos de mobilbidade individual autopropelidos, a seguir identificadas:

a) Resolução do CONTRAN Nº 996, de 15 de Junho de 2023
Dispõe sobre o trânsito, em via pública, de ciclomotores, bicicletas elétricas e equipamentos de mobilidade individual *autopropelidos*.

b) Resolução do CONTRAN Nº 993, de 15 de Junho de 2023
Estabelece os equipamentos obrigatórios para a frota de veículos em circulação e relaciona o índice de regulamentações sobre segurança veicular aplicáveis

Assim sendo, resta evidente que os elementos conceituais envolvidos na elaboração da legislação que contempla motocicletas, motonetas e ciclomotores, são plenamente compatíveis com a classe dos triciclos. Já a *tricicleta* se trata apenas uma bicicleta com mais uma roda, representando inclusive uma ciclística mais segura.

CONCLUSÃO

Este trabalho permite concluir que as *tricicletas* são uma alternativa sustentável, ou seja, contemplam o tripé social, ambiental e econômico. No lado social, atende às demandas de pessoas de pouca capacidade econômica, em várias atividades que envolvem deslocamentos de pessoas e pequenas cargas, com a vantagem de ser assistidas, ou seja, eliminando grande parte do esforço humano de uma tricicleta tradicional. Já no lado ambiental, é o tipo de veículo de grande eficiência energética, podendo ainda ter autonomia através de um pequeno painel solar. Outra contribuição ambiental diz respeito às suas dimensões, que contribuem no trânsito de grandes centros urbanos, sem geração de elementos poluentes. No âmbito

econômico, as tricicletas são fabricadas a partir de produtos já existentes no mercado, bastando um pequeno investimento, para se transformar em um veículo de propulsão assistida. Como qualquer pessoa pode propor uma lei, neste caso de competência da União, seria importante a abertura de um processo a ser para análise das Câmaras Temáticas e que uma vez aprovado, iria para o presidente do CONTRAN, no sentido de regulamentar a circulação da referida tricicleta. Também não menos importante é o objetivo de fomentar a implementação de uma metodologia desburocratizada para que este tipo de veículo possa ser construído por profissionais habilitados e posteriormente legalizado para circulação.

AGRADECIMENTO

O grupo agradece o apoio dos organizadores do RENOMAT e em especial ao Prof. Lírio Schaeffer, pelo incentivo às iniciativas.

Referências

[1] CANALLI V.M. – Projeto Guarda-Chuva Veículos Elétricos – Tricicleta elétrica, PUCRS, 2022

[2] SITE (2025) – TRICICLO ELÉTRICO COMERCIALIZADO - https://www.casasbahia.com.br/triciclo-eletrico-1000w-re-alarme-bagageiro-eko-10-vermelho/p/1565105143?utm_medium=Cpc&utm_sourc e=GP_PLA&IdSku=1565105143&idLojista=197631&tipoLojista=3P&gclsrc=aw.ds&&utm_campaign=cb_mkp_gg_shopping_sellers_abaixo10&gad_source=1&gad_campaignid=22788743736&gbraid=0AAAADtAamiUV3xZ0JOuzsrIw1BhseU0u&gclid=EAIaIQobChMI0eWVndWojwMVZBStBh0ttjFvEAQYASABEgKfqfD_BwE

[3] SITE (2025) - TRICICLETAS NO TRANSPORTE DE CARGAS E PASSAGEIROS - https:// s2.Glb img.com/px9k8JsutcXHkDgAJWj-4VZwKO0=/0x0:1280x853/984x0/smart/filters:stripicc()/i.s3.glbimg.com/v1/AUTH_59edd422c0c84a879bd37670ae4f538a/internal_photos/bs/2019/S/9/0wlcXQTgyltV94nPuAAw/whatsapp-image-2019-04-14-at-16.02.38-1-.jpeg

[4] SITE (2025) - TRICICLETA NO TRANSPORTE DE CARGAS - https://tse2.mm.bing.net/th/id/O I P.8 hszSpwU3CHPzZwEeBTJgwHaEB?rs=1&pid= ImgDet Main&o =7&rm=3

[5] SITE (2025)) - TRICICLETA NO TRANSPORTE DE PASSAGEIROS - https://conteudo.imguol.com.br /c/noticias/2014/09/13/12set2014---os-riquixas-originais-sao-veiculos-de-duas-rodas-puxados-por-tracao-humana-e-eram-simbolo-de-status-na-asia-antiga-hoje-a-versao-mais-moderna-deles-o-ciclo-riquixa -continua-fazendo-410604936021_956x500.jpg

[6] FITZZ – Manual de Instalação do Kit com motor no cubo do eixo, 2021

[7] FITZZ - Kit LED890– Display User Manual, 2021

[8] DE MORAIS J.P., DOS SANTOS G.M., BELLANCA E.T., MACHADO L.M., MARCHIORI M.C., BASTOS P.W.S., FRAGA V.C., CANALLI V.M., Veículos Propelidos a Eletricidade, RENOMAT 12th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies, 2023

[9] SITE (2025) – PLACA VEICULAR - https://www.harpyaleiloes.com.br/peca.asp?ID=3308740

[10] SITE (2025) – PLACA VEICULAR - https://www.santavelharia.com.br/peca.asp?ID=21851484

[11] SITE (2025) – PLACA VEICULAR - https://mg.olx.com.br/regiao-de-uberlandia-e-uberaba/antiguidades /placa-antiga-de-charrete-uberlandia-1947-peca-de-colecionador-1413791587

[12] DE MORAIS J.P., RAMBO C.E.B., MACHADO L.M., PIRES M.R., CANALLI V.M., Importância da Anexação da Espécie Veículo Didático à Classificação do Artigo 96 do Código de Trânsito Brasileiro, RENOMAT 14th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies, 2025

[13] BRASIL. Lei nº 9.503, de 23 de setembro de 1997. Institui o Código de Trânsito Brasileiro. Brasília, DF, 1997.

44º SENAFOR

28ª Conferência Internacional de Forjamento - Brasil
14ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas / 11º Congresso do BrDDRG
14ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis
3ª Conferência Internacional de Inovação em Materiais e Manufatura
Porto Alegre, RS, dias 1, 2 e 3 de outubro de 2025
www.senafor.com

Fatores Determinantes da Vida Útil de Baterias Estacionárias: Um Estudo de Caso sobre a Degradação em Flutuação

Stationary Batteries: Key Factors Affecting Service Life and a Case Study in a Wind-Solar Hybrid System

Polyane C P Resende[1]
Aquiles Rossoni[2]
Nalini S. Pereira [3]
Rafael V.S Fritsch[4]
Alexandre H. Silveira[5]

RESUMO

Baterias de chumbo-ácido reguladas por válvula (VRLA) são amplamente utilizadas em sistemas híbridos de energia para armazenamento e backup. Este estudo analisa um banco de baterias de 24 V e 470 Ah submetido a um regime de flutuação prolongado, por meio de testes de carga e descarga. O trabalho também identifica os principais mecanismos de degradação que reduzem a vida útil e a capacidade, como efeito *dry out*, autodescarga e sulfatação, que aumentam a resistência interna e comprometem a eficiência. Apesar de mais de dez anos em flutuação, a bateria apresentou a capacidade de descarga nominal e eficiência de ciclo de 96,9%, enquanto o sistema completo em corrente alternada, incluindo inversor e cabos, apresentou uma eficiência de ciclo de somente 76%. O estudo busca contribuir para estratégias de manutenção, previsão de falhas e projetos de sistemas de armazenamento.

Palavras-chave — Baterias Chumbo Ácido, Vida útil de baterias, Armazenamento de energia, Regime de flutuação.

---

[1] Graduanda, PUCRS. Brasil. polyane.resende@edu.pucrs.br.
[2] Doutor, URFGS. Brasil. aquiles.rossoni@pucrs.br.
[3] Mestre, UFRGS. Brasil. nalini.pereira@pucrs.br.
[4] Graduando, PUCRS. Brasil. rafael.013@edu.pucrs.
[5] Doutor, UFRGS. Brasil. alexandre.silveira@pucrs.br.

ABSTRACT

Valve-Regulated Lead-Acid (VRLA) batteries are widely used in hybrid energy systems, serving both as storage devices and backup power sources. This study analyzes a VRLA battery bank subjected primarily to prolonged float operation through controlled charge and discharge tests. The research also identifies the main degradation mechanisms that reduce service life and capacity, such as dry-out, self-discharge, and sulfation, which increase internal resistance and compromise efficiency. Despite operating for more than ten years, the battery demonstrated its nominal discharge capacity and a cycle efficiency of 96.9%. On the other hand, the complete alternating current system, including the inverter and cabling, showed a cycle efficiency of only 76%. This study aims to contribute to maintenance strategies and failure prediction in stationary applications and to provide insights for the design of energy storage systems.

Key words — Lead-Acid Batteries, Battery Service Life, Energy Storage, Float Operation

1. INTRODUÇÃO

A energia pode ser definida como a capacidade de um sistema de realizar trabalho. A energia possui suma importância na nossa vida, pois ela é a base para a compreensão de todos os fenômenos físicos e químicos, e a chave para o desenvolvimento tecnológico e a manutenção da nossa sociedade atualmente [1].

A utilização de energias renováveis para a produção de energia elétrica é uma mudança fundamental na transição para uma sociedade mais sustentável e consciente do meio ambiente, alinhada com a urgência de combater as alterações climáticas e os grandes impactos ambientais. Nesse contexto, o setor fotovoltaico (FV) e eólico tem apresentado um crescimento significativo ao longo dos anos, de modo que, em seu conjunto, irão representar mais de 50% da produção mundial de eletricidade nas próximas décadas [8].

No entanto, o crescimento dessas fontes de energia, que por natureza não são despacháveis (ou seja, sua produção não pode ser ajustada conforme a necessidade de consumo), coloca novos desafios para a gestão da rede elétrica. Isso torna a utilização de sistemas de acumulação de energia cada vez mais importante para garantir a estabilidade e a confiabilidade do fornecimento [3].

Os acumuladores de energia permitem ajustar o abastecimento de energia de acordo com as necessidades do utilizador, por exemplo, permitindo acumular os excedentes de produção e injetá-los na rede elétrica quando necessário, reduzindo o desperdício de energias e a pressão sobre a rede de distribuição [3]. Esses sistemas de acumulação de energia são importantes pois reforçam a implementação das energias renováveis. Entre as diversas formas de acumulação de energia elétrica, como o Armazenamento Hidrelétrico por Bombeamento (*Pumped Hydro Storage* - PHS), o armazenamento em ar comprimido (*Compressed Air Energy Storage* - CAES) ou células de combustível, as baterias destacam-se pela sua elevada densidade energética e baixo tempo de resposta [3].

Atualmente, entende-se que tanto pilhas (células eletroquímicas) quanto baterias convertem energia química em elétrica de forma espontânea. A diferença reside na composição: uma pilha é um dispositivo único com dois eletrodos (cátodo e ânodo) e um eletrólito, enquanto uma bateria é um conjunto de várias pilhas conectadas em série ou em paralelo [2].

Durante o processo de descarga de uma bateria, que é um processo espontâneo, o material ativo do ânodo (eletrodo negativo) é oxidado, transferindo elétrons que vão fluir

e gerar a corrente desejada, reduzindo o cátodo (eletrodo positivo), e permitindo que a bateria forneça energia.

As baterias de chumbo-ácido são opções para aplicação de armazenamento de energia, tendo sido utilizadas, principalmente, antes do avanço tecnológico e redução de preços das baterias de íons de lítio. Porém, estas estão sujeitas a diversos mecanismos de degradação que afetam sua vida útil e capacidade. Entre os principais efeitos percebidos, é possível citar o *dry-out* (ou secagem), que ocorre quando a perda excessiva de água torna o eletrólito mais concentrado, resultando em corrosão das estruturas da bateria e, consequentemente, na perda de sua eficiência. Há também o fenômeno de autodescarga, em que tende a ocorrer uma descarga espontânea da energia armazenada. Além disso, a sulfatação diminui a capacidade da bateria, aumentando sua resistência interna. Todos esses efeitos mencionados ocorrem naturalmente, porém, podem ser intensificados por fatores como temperatura de operação, descargas muito profundas ou tensão de flutuação inadequada.

Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo investigar os principais mecanismos de degradação que afetam a vida útil e a capacidade de baterias de chumbo-ácido, assim como analisar o desempenho do sistema de armazenamento de um sistema de geração híbrido real, no qual as baterias foram mantidas em flutuação prolongada durante a maior parte de sua operação, durante aproximadamente dez anos.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Este referencial teórico apresenta as principais características relacionadas ao funcionamento das baterias, aos fenômenos de perda de capacidade e eficiência e às características nominais.

2.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO E DEGRADAÇÃO DAS BATERIAS

O funcionamento de uma bateria de chumbo-ácido fundamenta-se em reações eletroquímicas reversíveis que convertem energia química em energia elétrica. Este dispositivo é uma célula galvânica composta por um ânodo de chumbo metálico (Pb) e um cátodo de dióxido de chumbo (PbO_2), ambos imersos em uma solução aquosa de ácido sulfúrico (H_2SO_4), que atua como eletrólito, sendo responsável por possibilizar o fluxo de elétrons entre os eletrodos, assim como, participar ativamente das reações.

Durante o processo de descarga, uma diferença de potencial entre os eletrodos impulsiona o fluxo de elétrons. No ânodo, o chumbo metálico é oxidado, reagindo com íons sulfato do eletrólito para formar sulfato de chumbo ($PbSO_4$) e liberar elétrons no circuito externo. Simultaneamente, no cátodo, o dióxido de chumbo é reduzido, consumindo os elétrons provenientes do circuito externo, reagindo com íons hidrogênio e sulfato do eletrólito para também formar sulfato de chumbo e água (H_2O). Como resultado, em ambos os eletrodos se forma um depósito de sulfato de chumbo, e o eletrólito se torna mais diluído devido ao consumo de ácido sulfúrico. A reação global deste processo é demonstrada em (1).

$$Pb(s) + PbO2(s) + 2\,H2SO4(aq) \leftrightharpoons 2\,PbSO4(s) + 2\,H2O(l) \quad (1)$$

Obtém-se como resultado, a geração de uma tensão de aproximadamente 2,1V por célula. A bateria é composta por várias células, podendo ser rearranjada em série para atingir a tensão desejada.

No processo de recarga, ocorre o processo inverso à descarga, os elétrons tendem a retornar ao estado original com a excitação provocada por uma corrente elétrica de recarga, saltando a níveis de energia maiores [7].

2.1.1 SULFATAÇÃO

Decorrente da reação de redução, é produzido sulfato de chumbo e água no cátodo da bateria, conforme a reação demonstrada em (2).

$$PbO_2(s) + {SO_4}^{2-}(aq) + 4H^+ + 2e^- \leftrightharpoons \mathrm{PbSO_4}(s) + 2\,H_2O\,(l) \quad (2)$$

Na reação de oxidação, ocorre a conversão do chumbo em sulfato de chumbo, conforme a reação em (3).

$$Pb(s) + {SO_4}^{2-}(aq) \leftrightharpoons \mathrm{PbSO_4}(s) + 2\,e^- \quad (3)$$

A formação de cristais de sulfato de chumbo (PbSO4) ocorre em ambos os eletrodos quando a bateria é descarregada. Esse processo consome o íon sulfato (SO4−2) do ácido sulfúrico (H2SO4). Como o ácido é consumido e água (H2O) é produzida, a densidade da solução do eletrólito diminui. Por isso, quanto mais descarregada estiver a bateria, menor será sua densidade e maior a quantidade de sulfato nos eletrodos. No ciclo de carga (processo inverso), os cristais de sulfato se dissolvem facilmente e são convertidos de volta em dióxido de chumbo (PbO2) no eletrodo positivo e em chumbo (Pb) no eletrodo negativo.

No entanto, se a bateria não for operada corretamente, por exemplo, se for deixada em estado de carga baixa por um longo período, os cristais de sulfato de chumbo se tornam grandes e não se dissolvem facilmente na recarga, levando a uma sulfatação irreversível. A consequência da sulfatação é a criação de uma camada elétrica isolante que retarda a difusão do ácido. Com a difusão dificultada, o ácido não consegue reagir com toda a superfície dos eletrodos, causando uma queda no desempenho e na capacidade da bateria, pois a área de reação é reduzida e a resistência interna aumenta, dificultando a recarga completa e a entrega de energia. Por isso, é recomendável uma profundidade de descarga em torno de 50%, sendo geralmente especificada pelo fabricante.

2.1.2 AUTODESCARGA

A descarga da bateria é um processo espontâneo e por isso existe uma taxa de auto descarga, que é a perda gradual de carga mesmo quando não há nenhuma carga conectada. Este fenômeno é conhecido como auto descarga. Por isso, após o carregamento das baterias é aplicada uma tensão de flutuação que serve para manter a carga total na bateria.

2.1.3 EFEITO *DRY OUT*

Quando a bateria é recarregada, ocorre o processo inverso à descarga e juntamente, a reação de eletrólise da água, que se intensifica no final da carga, gerando oxigênio gasoso na superfície da placa positiva e hidrogênio gasoso na superfície da placa negativa, conforme demonstrado em (4), (5) e (6).

$$2\,H_2O(l) \leftrightharpoons O_2(g) + 4\,H^+ + 4\,e^- \quad (4)$$

$$2\,H^+ + 2e^- \leftrightharpoons H_2 \quad (5)$$

$$2\,H_2O\,(l) \leftrightharpoons O_2(g) + 2\,H_2(g) \quad (6)$$

As baterias do tipo com regulação de válvula (VRLA) tendem a ter uma recombinação interna, chamada de ciclo do oxigênio, que consome o oxigênio gerado internamente e diminui a evolução do hidrogênio. Esse tipo de bateria gera hidrogênio, mas em proporções menores, diminuindo a perda de água [2].

Nesse ciclo, o oxigênio gerado difunde-se até a placa negativa, reagindo com o chumbo metálico (Pb) para formar óxido de chumbo (PbO). Em seguida, esse óxido reage com o ácido sulfúrico (H_2SO_4), formando sulfato de chumbo ($PbSO_4$) e água (H_2O), conforme (7)-(10).

$$O_2(g) + 2\,Pb(s) \leftrightharpoons 2\,PbO(s) \tag{7}$$

$$2\,PbO + 2\,H_2SO_4 \leftrightharpoons 2\,PbSO_4 + 2\,H_2O\,(l) \tag{8}$$

$$2\,PbSO_4 + 4\,H^+ + 4\,e^- \leftrightharpoons 2\,Pb + 2\,H_2SO_4 \tag{9}$$

$$Reação\ global: O_2(g) + 4\,H^+ + 4\,e^- \leftrightharpoons 2\,H_2O\,(l) \tag{10}$$

Na etapa de recarga, o sulfato de chumbo retorna às formas originais de chumbo metálico, dióxido de chumbo e ácido sulfúrico, recuperando as condições iniciais da bateria. Quando esse equilíbrio é comprometido, a geração de oxigênio ocorre em velocidade superior à recombinação, levando à perda de água, aumento da concentração de ácido e início de processos corrosivos nas grades da bateria, comprometendo progressivamente a eficiência e a durabilidade da bateria [7].

Os principais responsáveis pelo efeito de secagem (*dry out*) da bateria são a tensão de flutuação ou descarga, recargas inadequadas, e a sulfatação intensa [7]. Este fenômeno corresponde à secagem do eletrólito nas baterias, resultando em perda de desempenho e redução da vida útil.

2.1.4 CORROSÃO DAS GRADES DA BATERIA

Conforme as reações de carga e descarga ocorrem na bateria, e a secagem do eletrólito tende a ocorrer, a concentração do eletrólito aumenta, intensificando a corrosão das grades de chumbo positiva, limitando a capacidade da bateria, causando perda de capacidade de conduzir corrente e perda precoce de sua vida útil. Aplicar tensões de flutuação com níveis incorretos, resultando em perda precoce da capacidade da bateria e de sua vida útil, em um valor abaixo da adequado ocorre recargas insuficientes e intensificação da sulfatação, provocando o aumento da resistência interna e provocando a secagem. Em níveis acima do adequado, ocorre a sobrecarga, aumento da corrente de flutuação, corrosão prematura e a secagem do eletrólito.
O que provoca a perda de vida útil da bateria, não é o efeito de “secagem” em si, mas a consequência deste e sua intensificação. Através da secagem, há um aumento da concentração do eletrólito, intensificando o efeito de corrosão das grades positivas, fazendo com que a bateria se torne um circuito condutor de energia menos eficiente, e assim, perdendo energia e vida útil. A corrosão das grades é um processo natural a longo prazo, porém faz-se necessário ter a consciência da intensificação desse efeito, assim como o efeito de *dry out.*

2.2 CAPACIDADE

A capacidade nominal de uma bateria é a sua capacidade máxima em condições nominais, ou seja, o quanto de eletricidade a bateria pode fornecer até ficar descarregada em determinadas condições de descarga, conforme é apresentado em (11). A capacidade da bateria depende significativamente da temperatura ambiente, assim como sua vida útil. A faixa de temperatura recomendada para operação é entre 15°C e 35°C.

Os fabricantes especificam a capacidade nominal de uma bateria (em Ampere-hora, Ah) sob condições de descarga padronizadas, geralmente para diferentes regimes

de tempo (C10, C20, C100, etc.). Sendo os valores apresentados relacionados ao número de horas de descarregamento.

$$C = I \times t \tag{11}$$

Onde:
C: Capacidade nominal [Ah];
I: Corrente de descarga constante [A];
t: Tempo de descarga [h].

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O Centro de Demonstração de Energias Renováveis (CEDER), localizado na Escola Politécnica da PUCRS, foi fundado em 2015 com o propósito de promover o ensino e a pesquisa na área de energias renováveis. O centro conta com a geração de energia solar e eólica, além dos sistemas de controle e o sistema de armazenamento de energia, composto por 12 baterias de chumbo – ácido ligadas em série, produzindo uma tensão nominal de cerca de 24V. O processo de carregamento e descarga dessas baterias é controlado por um inversor *off-grid*. A Figura 1 apresenta um diagrama unifilar do CEDER.

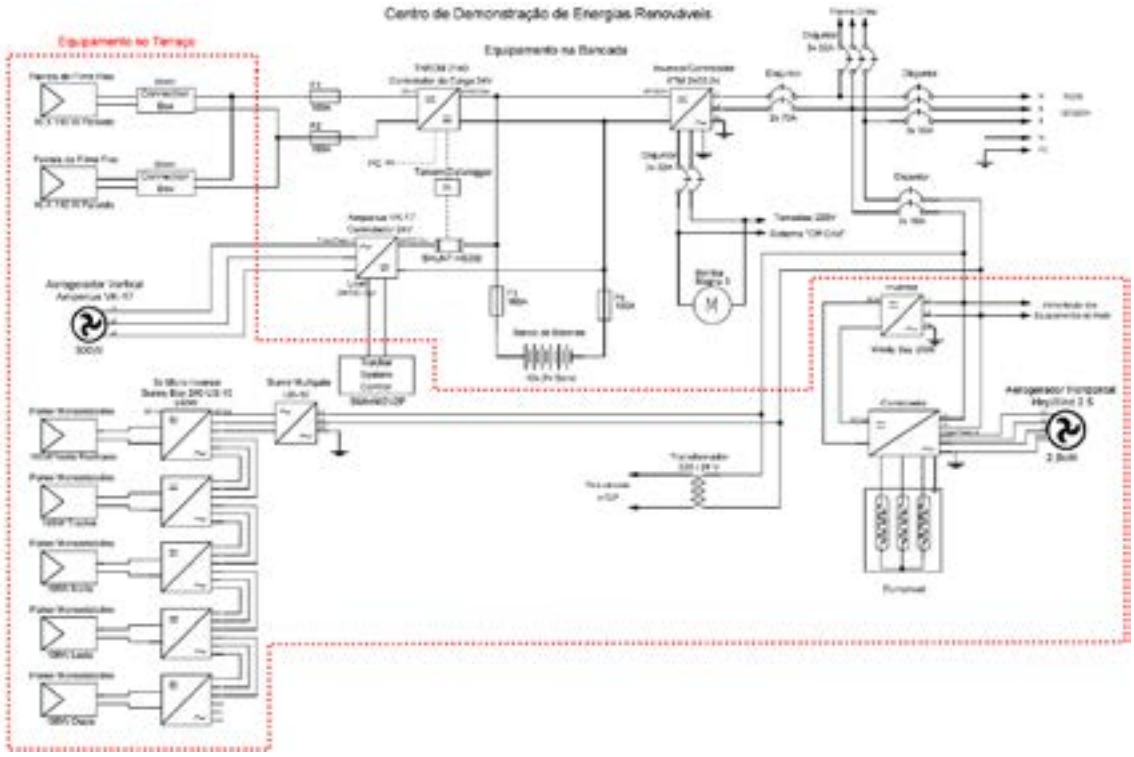


Figura 1- Diagrama unifilar do CEDER

O banco de baterias opera predominantemente em regime de flutuação prolongada, desde o início do centro, o que dificulta a determinação precisa do seu estado e o controle rigoroso das condições de operação. Assim, durante os testes de descarga, é esperado que os valores de capacidade e energia disponibilizada apresentem redução em relação às especificações nominais, decorrente do longo período em operação contínua sem monitoramento detalhado e dos processos de degradação anteriormente citados.

O ensaio de descarga foi realizado utilizando um banco de resistências controlado pelo inversor, ajustado para simular as condições nominais de descarga do

fabricante. Foram utilizados multímetros, bem como dados de medição do próprio inversor, para monitorar as tensões e correntes da bateria, carga e fornecida pela rede elétrica.

Considerando que baterias são uma fonte de corrente contínua (CC), para a realização do ensaio envolvendo o uso de bancos de carga resistivos que operam em corrente alternada (CA), é necessário reavaliar os parâmetros de descarga em corrente contínua (CC) do fabricante para os parâmetros CA equivalentes, que devem ser configurados no banco de cargas.

De acordo com o manual do fabricante, o banco de baterias do CEDER possui as seguintes especificações, apresentadas na Tabela 1. Os próximos subitens apresentam as relações de potência em corrente contínua e alternada.

3.1 POTÊNCIA EM CORRENTE CONTÍNUA (CC)

A potência que o banco de baterias fornece pode ser calculada pela relação entre a tensão e a corrente de descarga, segundo (12).

$$P_{CC} = V_{CC} \times I_{CC} \tag{12}$$

Onde:
P_{CC}: Potência em corrente contínua [W];
V_{CC}: Tensão nominal do banco de baterias [V];
I_{CC}: Corrente de descarga em corrente contínua [A].

Tabela 1- Parâmetros do banco de baterias

Condição de descarga	C100/1.85 V	C50/1.85 V	C24/1.83 V	C10/1.80 V	C5/1.77 V
Capacidade nominal (Ah)	574	543	513	470	415
Tempo de descarga (h)	100	50	24	10	5
Corrente de descarga CC (A)	5,74	10,86	21,375	47	83
Tensão nominal CC (V)	24	24	24	24	24
Potência de descarga CC (W)	137,76	260,64	513	1128	1992

3.2 CONVERSÃO DE ENERGIA E POTÊNCIA

A conversão da energia em CC para CA é realizada por um inversor, um importante componente dos sistemas híbridos. Porém, este processo não é 100% eficiente, e devido a perdas internas, a energia de saída é sempre menor que a energia de entrada no equipamento. A relação entre a potência que o inversor consome da bateria e a que converte em potência de corrente alternada pode ser definida por (13).[4].

$$P_{CA} = P_{CC} \times \eta \tag{13}$$

Onde:
P_{CA}: Potência em corrente alternada [W];
P_{CC}: Potência em corrente contínua [W];
η: Eficiência do inversor.
A potência em um circuito CA monofásico é dada por:

$$P_{CA} = V_{CA} \times I_{CA} \times \cos \emptyset \tag{14}$$

Onde:
P_{CA}: Potência em corrente alternada [W];
V_{CA}: Tensão de saída do inversor [V];

I_{CA}: Corrente de saída do inversor [A];

Cos φ: Fator de Potência (FP) da carga. Para bancos de carga puramente resistivos, o Fator de Potência é considerado 1.

Com o objetivo de calcular a corrente CA que deve ser configurada no banco de cargas, para simular uma descarga em cada condição nominal especificada, é apresentada a Tabela 2, contendo os dados obtidos.

O objetivo deste trabalho também é testar o sistema de armazenamento como um todo, simulando a sua atuação em um contexto de rede elétrica, com fornecimento de energia em corrente alternada. Para tanto, é analisado o desempenho das baterias em corrente contínua e a eficiência na absorção e fornecimento de energia em corrente alternada, considerando as perdas relacionadas ao processo de conversão.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos durantes os experimentos. A Figura 2 apresenta a estrutura de teste, com o banco de baterias, inversor, cargas e equipamentos de instrumentação. A Figura 3 apresenta o acompanhamento da temperatura das baterias durante o ensaio. A temperatura se manteve dentro da recomendação do fabricante (15^0 a 35^0 C) durante os ensaios.

Tabela 2 – Condições obtidas para a realização do ensaio de descarga

Eficiência do conversor	0,94				
Tensão de saída CA (V)	220				
Fator de potência (FP)	1				
Condição de descarga	**C100/1.85 V**	**C50/1.85 V**	**C24/1.83 V**	**C10/1.80 V**	**C5/1.77 V**
Potência de descarga CC (W)	137,76	260,64	513	1128	1992
Potência de saída CA (W)	129,4944	245,0016	482,22	1060,32	1872,48
Corrente de saída CA (A)	0,589	1,114	2,192	4,820	8,511

Figura 2- Teste de Carga e Descarga em Sistema de Armazenamento de Energia

Figura 3- Monitoramento da Temperatura nas Baterias Durante os Ensaios

O teste de descarga foi conduzido na condição C10, na qual a bateria deveria fornecer aproximadamente 11,28 kWh ao longo de um regime de descarga de 10 horas. O ensaio foi iniciado às 09:30 do dia 08 de julho de 2025 e concluído às 19:30 do mesmo dia, totalizando 10 horas de operação.

Com base nos dados registrados, a energia fornecida pela bateria, medida diretamente em seus terminais, em corrente contínua, foi de aproximadamente 12,00 kWh. Entretanto, nos terminais do banco de cargas, a energia efetivamente disponibilizada foi de 10,29 kWh, resultando em uma eficiência energética global de 85,76%. Essa diferença pode ser atribuída a perdas elétricas inerentes ao sistema, como nos cabos e conexões, e principalmente ao inversor.

Em relação à capacidade nominal especificada (11,28 kWh), observou-se que a bateria entregou 12,00 kWh, correspondendo a 106% da capacidade nominal. Esse desempenho superior pode estar associado a alguns fatores. Os equipamentos de medição possuem erros, portanto, pequenas diferenças são esperadas. O fabricante, para garantir o desempenho em diferentes condições, provavelmente fornece um valor mínimo, sendo possível que a bateria desempenhe melhor em condições favoráveis, como nas temperaturas amenas do dia do teste. Neste ponto, é ressaltado que, apesar do tempo de uso e manutenção em regime de flutuação por mais de dez anos, as baterias continuam apresentando desempenho adequado em relação à capacidade de armazenamento.

A Figura 4 apresenta uma representação gráfica da evolução da tensão nos terminais da bateria ao longo do período de descarga, até a tensão de corte especificada para o sistema.

Figura 4- Tensão por célula ao longo do tempo de descarga de 10 horas, até a tensão de corte de 1,8V.

Além do ensaio de descarga, foi realizado um ensaio de recarga com o objetivo de determinar a quantidade de energia necessária para recarregar a bateria. O processo de recarga teve duração de 12 horas, sendo conduzido por meio do inversor que atuou como carregador. As medições foram realizadas utilizando multímetros conectados diretamente aos terminais da bateria, bem como os dados fornecidos pelo visor do inversor.

Durante o processo, verificou-se que a bateria recebeu aproximadamente 12,38 kWh de energia. No entanto, considerando a energia fornecida pela rede elétrica ao inversor, o valor registrado foi de 13,61 kWh, resultando em uma eficiência energética global de 90,9%, justificável pelas perdas associadas à conversão de energia e aos cabos de conexão.

Ao relacionar a energia efetivamente entregue pela bateria ao banco de cargas no ensaio de descarga (12,00 kWh) com a energia necessária para o processo de recarga (12,38 kWh), obteve-se uma eficiência de 96,9% de ciclo, considerada elevada para sistemas desse tipo. Esse valor pode indicar que o processo de recarga não alcançou o ciclo completo de carga da bateria e, também, pode ser decorrente dos erros dos equipamentos de medição. Porém, destaca-se que a bateria apresenta um rendimento elevado, apesar de estar em operação a dez anos.

A figura 5 apresenta a curva de carga obtida para esta bateria, utilizando os dados obtidos durante o ensaio de recarga.

Figura 5 - Curva de carga da bateria

Por outro lado, a eficiência de ciclo do sistema, considerando os elementos em corrente alternada, foi de apenas 76%. Este valor é obtido ao dividir a energia recebida pela carga (10,29 kWh) pela energia absorvida pela rede (13,61 kWh). Essa eficiência foi considerada particularmente baixa para aplicações de regulação de fontes intermitentes de energia ou deslocamento de demanda, dado que mais de 20% da energia foi perdida no ciclo de carregamento e descarregamento. Estas perdas estão principalmente relacionadas ao processo de conversão de energia e perdas Joule, nos condutores, por exemplo. Os resultados encontrados demonstram que esta pode ser uma característica importante a ser avaliada nos projetos de sistemas de armazenamento de energia.

5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos demonstraram que, mesmo após mais de dez anos de operação em regime de flutuação, o banco de baterias VRLA analisado manteve desempenho satisfatório em termos de capacidade e eficiência de ciclo, evidenciando a robustez dessa tecnologia para aplicações estacionárias. Tal desempenho é notável, considerando-se a ausência de monitoramento contínuo e as degradações previstas decorrentes dos fatores que foram anteriormente enunciados. Contudo, as perdas significativas identificadas no sistema em corrente alternada, principalmente relacionadas à conversão de energia e a perdas resistivas, indicam a necessidade de maior atenção ao projeto e à manutenção dos componentes auxiliares, como inversores e cabos, a fim de otimizar a eficiência global do armazenamento. Assim, este estudo contribui para o entendimento dos mecanismos de degradação em flutuação e reforça que a implementação de rotinas de manutenção preventiva e sistemas de controle e monitoramento poderiam prolongar a vida útil e corroborar para a otimização do desempenho das baterias, além de proporcionar uma maior previsibilidade dos

mecanismos de degradação, auxiliando nas estratégias de monitoramento e manutenção dos sistemas de armazenamento de energia.

REFERÊNCIAS

[1] HALLIDAY, DAVID; RESNICK, ROBERT; WALKER, JEARL. Fundamentos de Física, Volume 1: Mecânica. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

[2] CARNEIRO, R. L. et al. Aspectos essenciais das Baterias Chumbo-Ácido e Princípios Físico-Químicos e Termodinâmicos do seu Funcionamento. Revista Virtual de Química, [S. l.], v. 9, n. 3, p. 889-911, 7 jun. 2017.

[3] Távora, G... [et.al.] - Evolução tecnológica no armazenamento de energia: uma perspectiva a partir das patentes de baterias. In: CIES2020: As Energias Renováveis na Transição Energética: Livro de Comunicações do XVII Congresso Ibérico e XIII Congresso Ibero-americano de Energia Solar. Helder Gonçalves, Manuel Romero (Ed.). Lisboa, Portugal: LNEG, 3-5 Novembro, 2020, p. 1323-1329

[4] HAYT JR., WILLIAM H.; KEMMERLY, JACK E.; DURBIN, STEVEN M. Análise de circuitos em engenharia. 8. ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

[5] HOPPECKE BATTERIES. VRL Manual. [S. l.]: Hoppecke Batteries, [s.d.]. Disponível em: https://www.hoppecke.com/fileadmin/Redakteur/Hoppecke-Main/Products-Import/vrl_manual_en.pdf. Acesso em: 25 jun. 2025.

[6] STECA ELEKTRONIK GMBH. Xtender User Manual. V4.4.0. Sion: Steca Elektronik GmbH, 2015

[7] BRAGA, PAULO HENRIQUE. Análise de parâmetros e perda de vida útil da bateria de chumbo ácido em regime de flutuação. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, 2019.

[8] IRENA – International Renewable Energy Agency. Global Renewables Outlook: Energy Transformation 2050. Abu Dhabi, IRENA, 2020.

[9] BRIK, KAIS; AMMAR, FAOUZI BEN. Causal tree analysis of depth degradation of the lead acid battery. *Journal of Power Sources*, v. 228, p. 39-46, 2013. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.10.088.

[10] PESENTI, GILCINEA R. et al. Envelhecimento Acelerado de Baterias Chumbo-ácidas Estacionárias para Diagnósticos de Falhas e Expectativa de Substituição. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 18., 2008, Olinda. Anais [...]. Olinda: SENAI, 2008.

44º SENAFOR

28th International Forging Conference
13th International Sheet Metal Forming Conference / 10th BrDDRG Congress
13th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies – Brazil/RS
2nd International Conference on Innovation in Materials and Manufacturing
Hotel Plaza São Rafael – P. Alegre RS, October 2-4, 2024

Estimação de Geração de Energia Fotovoltaica: Análise Comparativa entre Softwares e Medições Reais

Estimation of Photovoltaic Energy Generation: Comparative Analysis Between Software Tools and Real Measurements

Rafael V.S Fritsch[1]
Aquiles Rossoni [2]
Nalini S. Pereira [3]
Polyane C.P Resende [4]
Alexandre H. Silveira [5]

RESUMO

O setor de energia solar fotovoltaica tem apresentado crescimento expressivo nos últimos anos. Com o objetivo de auxiliar o planejamento de projetos, diversas metodologias e softwares foram desenvolvidos para estimar a energia gerada. Este trabalho compara abordagens analíticas, baseadas em dados de irradiação, e softwares dedicados para sistemas fotovoltaicos. A análise foi realizada em um sistema do Centro de Demonstração de Energias Renováveis da PUCRS, composto por cinco módulos de 335 W conectados a um inversor on-grid de 2 kW. O estudo destaca diferenças entre métodos analíticos e computacionais, permitindo avaliar a precisão e limitações de cada metodologia.

Palavras-Chave: energia fotovoltaica, estimação de energia, softwares, métodos analíticos.

[1] Graduando, PUCRS. Brasil. rafael.013@edu.pucrs.
[2] Doutor, URFGS. Brasil. aquiles.rossoni@pucrs.br.
[3] Mestre, UFRGS. Brasil. nalini.pereira@pucrs.br.
[4] Graduanda, PUCRS. Brasil. polyane.resende@pucrs.br.
[5] Doutor, UFRGS. Brasil. alexandre.silveira@pucrs.br.

ABSTRACT

The photovoltaic solar energy sector has shown significant growth in recent years. To support project planning, various methodologies and software tools have been developed to estimate the energy generated. This study compares analytical approaches, based on irradiation data, with specialized photovoltaic system software. The analysis was conducted on a system at the Renewable Energy Demonstration Center of PUCRS, consisting of five 335 W modules connected to a 2 kW on-grid inverter. The study highlights the differences between analytical and computational methods, allowing for an evaluation of the accuracy and limitations of each methodology.

Keywords: photovoltaic energy, energy estimation, software, analytical methods.

1. INTRODUÇÃO

A energia é definida de forma abstrata como a capacidade de realizar trabalho ou transferir calor [6]. Considerando essa definição, o Planeta Terra é um sistema no qual toda a vida depende, direta ou indiretamente, da energia proveniente da Estrela Sol [8], uma vez que o mesmo é responsável por fornecer luz, calor e por impulsionar processos fundamentais como o ciclo da água, o funcionamento dos ecossistemas e, mais recentemente, o desenvolvimento de tecnologias baseadas no efeito fotovoltaico.

Historicamente, o modo como a humanidade consome e compreende a energia passou por notórias transformações. Durante grande parte da história, as fontes de energia dos seres humanos se restringiam à alimentação, iluminação e aquecimento [7]-[8]. Porém, com o advento da globalização e evolução nos métodos e padrões da sociedade, especialmente por eventos como Revoluções Industriais, consolidação de sistemas políticos extrativistas, advento da globalização e evolução nos métodos e padrões sociais, urbanização e crescimento populacional, fez-se esta reconfiguração energética [7].

Deste modo, justifica-se a busca por fontes renováveis e sustentáveis, visto que a geração energética de baixo impacto ambiental, como solar e eólica, é crucial para redução de eventos ambientais e climáticos maléficos, visando mitigar o aumento da temperatura média global, provocadas pelo uso intensivo de combustíveis fósseis [10].

No contexto de transição energética, dada a supracitada importância da Estrela Sol, a energia fotovoltaica, ou seja, energia proveniente dos fótons presentes na radiação luminosa incidente do Sol, se revela como uma alternativa viável.

No Brasil, o setor fotovoltaico tem apresentado crescimento expressivo e consistente ao longo dos anos, tanto em capacidade instalada quanto em geração elétrica, consolidando-se como uma das principais fontes entre as tecnologias de energias renováveis. De acordo com dados de 2024 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e da Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR), a energia solar fotovoltaica já representa 23,2% da Matriz Elétrica Brasileira, somando mais de 59GW em operação. Essas informações são evidenciadas na Figura 1.

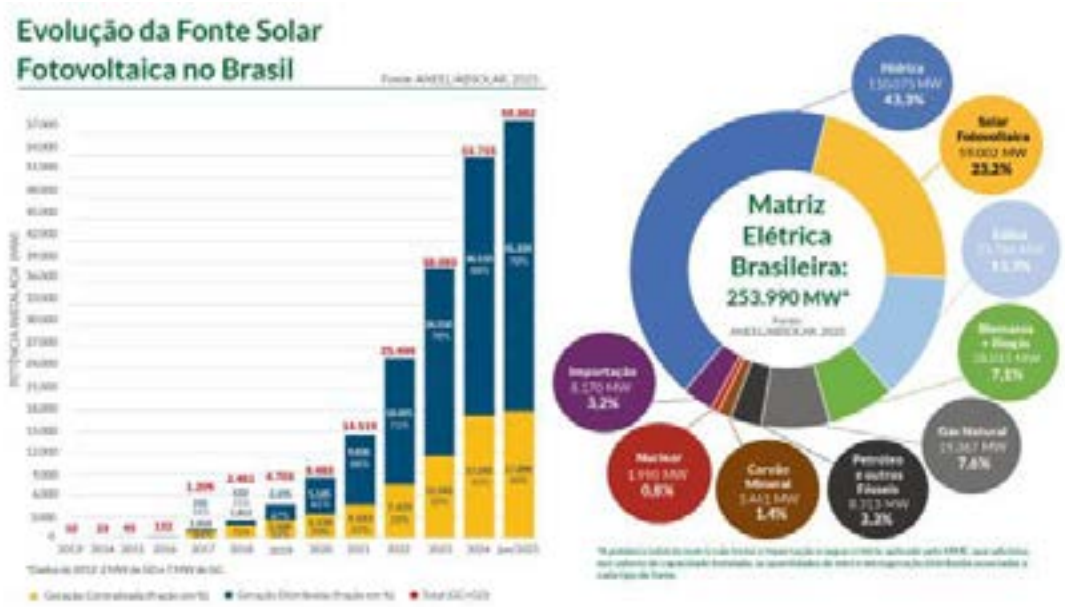


Figura 1: Relação da Energia Fotovoltaica na Matriz Elétrica Brasileira. Adaptado de [4].

Dado tamanho crescimento do setor fotovoltaico, evidencia-se a necessidade de um adequado dimensionamento, estimação e simulação das condições dos sistemas fotovoltaicos, a fim de garantir viabilidade econômica, segurança operacional e, evidentemente, maior previsibilidade no desempenho ao longo do tempo [9]-[5]. Para tanto, destacam-se ferramentas computacionais pagas amplamente utilizadas, como o PV*Sol, HOMER, PVsyst, além de outras gratuitas como o OpenSolar e RetScreen. Além disso, métodos analíticos como os propostos por [11] para Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCR) também são empregados para estimativas.

Diante desse cenário, o presente descritivo tem como objetivo realizar uma análise comparativa entre diferentes metodologias de estimação da geração de energia fotovoltaica, tanto por meio de ferramentas computacionais especializadas quanto por abordagens analíticas, baseadas em dados de irradiação, em relação aos dados reais medidos em um inversor fotovoltaico de um sistema operante. A proposta visa avaliar a acurácia e as limitações de cada abordagem frente às condições reais de operação.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

A palavra “fotovoltaico” vem do grego *photos*, que significa luz, e de Volta, nome do físico italiano que, em 1800, descobriu a pilha elétrica. O efeito fotovoltaico, fenômeno físico que permite a conversão da luz em eletricidade, teve suas primeiras observações no século XIX [11].

Seu desenvolvimento avançou significativamente no século XX com a tecnologia de semicondutores, possibilitando a expansão da indústria fotovoltaica para aplicações aeroespaciais, militares e geração de eletricidade em larga escala, evidenciada atualmente [11].

Em uma configuração básica, um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede (SFCR) é composto, de forma simplificada, por três elementos principais: o gerador fotovoltaico, o inversor e a rede elétrica local [11]. Conforme a Figura 2.

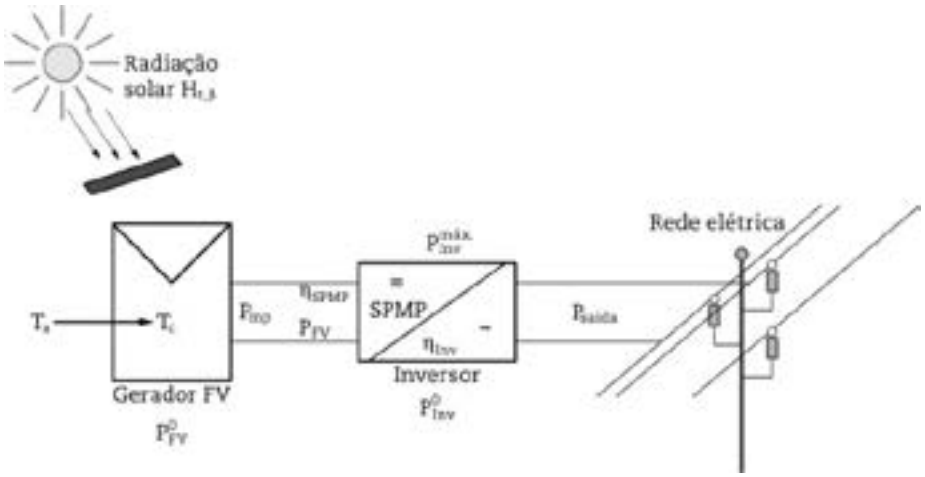


Figura 2: Composição Básica de um SFCR. [11].

Inicialmente, o gerador fotovoltaico converte a energia dos fótons do Sol em energia elétrica de Corrente Contínua (CC), que é então processada na unidade de potência (inversor fotovoltaico), onde acontece sua transformação em Corrente Alternada (CA) para ser injetada na rede elétrica. Durante esse processo, ocorre diversas perdas relacionadas a diferentes etapas e diversos fatores, como o aumento da temperatura do gerador, as difusões ôhmicas nos cabos e as dissipações associadas ao rastreamento do ponto de máxima potência (SPMP). Além disso, há limitações inerentes à conversão realizada pelo inversor. Todas essas quedas de rendimento influenciam diretamente na eficiência global de conversão de energia de um SFCR [11].

Por apresentar um número considerável de fugas de energia, desenvolveu-se métodos que permitem simulações aprofundadas fundamentadas através de informações climáticas, características dos módulos e inversores, detalhamentos dos sistemas, sombreamento e perfil de carga.

Como exemplo, tem-se o software pago alemão PV*SOL, que calcula a energia gerada por sistemas fotovoltaicos com base em simulações horárias, utilizando medições climáticas em bancos de dados, como o MeteoSyn e Meteonorm 8, e características técnicas dos módulos e inversores. A radiação solar horizontal é convertida para o plano inclinado utilizando como base algoritmos como de Hay & Davies, Perez, Reindl, Hofmann e Liu & Jordan considerando sombreamento, albedo e orientação [13].

A potência gerada é ajustada por perdas elétricas, térmicas e ópticas, conforme normas como a *IEC 61724* e a *EN 50530*, de forma que o software forneça a energia gerada em corrente alternada, com métricas como produtividade específica e dissipações totais.

Em substituição aos métodos pagos, destaca-se o OpenSolar, um software gratuito voltado à simulação de sistemas fotovoltaicos, especialmente em etapas iniciais de dimensionamento. Embora possua menor complexidade técnica em comparação a ferramentas comerciais como PV*Sol ou PVsyst, o OpenSolar se mostra eficiente em análises preliminares e apresenta interface mais amigável. A plataforma possui parceria com o Laboratório Nacional de Energia Renovável (NREL), vinculado ao Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE), permitindo comparação dos resultados obtidos [15].

Ademais, conforme [11], a estimativa da potência de um SFCR pode ser determinada por meio da Equação 1 abaixo:

$$P_{FV} = P_{FV}^{0} \frac{H_{t,\beta}}{H_{ref}} \left[1 - v_{mp} \left(T_C - T_{C,ref}\right)\right] \cdot \eta_{SPMP} \quad (1)$$

Na qual:

- P_{FV} - Potência elétrica gerada pelo sistema fotovoltaico (W);
- P_{FV}^{0} - Potência nominal de geração, medida em *Standard Test Conditions* (STC) (W);
- $H_{t,\ \beta}$ - Irradiação solar global incidente no plano inclinado dos módulos, durante o período considerado (kWh/m²);
- H_{ref} - Irradiação solar de referência em STC (kWh/m²);
- v_{mp} - Coeficiente de temperatura da potência máxima do módulo fotovoltaico (%/°C);
- T_C - Temperatura de operação dos módulos fotovoltaicos (°C);
- $T_{C,\ ref}$ - Temperatura de referência em STC;
- η_{SPMP} - Eficiência do sistema de rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT).

Apesar de apresentar uma metodologia precisa para a estimativa da potência gerada, a equação proposta demanda a obtenção de diversas variáveis de difícil monitoramento em campo, o que torna sua aplicação prática limitada em estudos com menor disponibilidade de dados.

Por esse motivo, é comum a utilização de formulações simplificadas, que consideram as diversas perdas e variáveis como uma única Taxa de Desempenho (TD). Nesse aspecto, destaca-se duas versões para a fórmula de estimação de geração fotovoltaica, conforme Equação 2 [12].

$$E = P_{FV}^{0} \times HSP_{MA} \times TD \quad (2)$$

No qual:

- E – Energia estimada gerada pelo módulo fotovoltaico (Wh/dia)
- HSP_{MA} – Irradiação Solar (kWh/m^2/dia)

Neste tipo de caso, é utilizada a irradiação solar incidente, que corresponde a energia irradiada em uma área específica durante um período [1]. Ao reconhecer a influência direta dessa variável na previsão de energia gerada, opta-se pela utilização de bases de dados para possibilitar o cálculo de estimação.

Para tanto, nota-se o banco de dados do CRESESB, que se utiliza da ferramenta SunData para o fornecimento de registros sobre irradiação solar diária média mensal em qualquer ponto do Brasil. O programa foi atualizado em 2017 com informações da 2ª Edição do Atlas Brasileiro de Energia Solar, elaborado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia (LABREN), com base em 17 anos de imagens de satélite (1999–2015) e cerca de 72.000 pontos de coleta com espaçamento de aproximadamente 10 km [17].

Destaca-se, ainda, o RADIASOL2, desenvolvido pelo LABSOL da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), que corresponde a uma ferramenta computacional voltada ao cálculo da irradiação solar em superfícies inclinadas, considerando a distribuição espacial e temporal da radiação solar. O programa utiliza modelos matemáticos consagrados na literatura e próprios do laboratório, permitindo ao usuário selecionar diferentes métodos de distribuição da radiação [14].

3. METODOLOGIA

A análise comparativa do sistema fotovoltaico foi conduzida no Centro de Demonstração de Energias Renováveis (CEDER). Vinculado à Escola Politécnica da PUCRS, fundado em 2015, com o propósito de promover ensino, pesquisa e extensão na área de energias renováveis. Fruto de uma cooperação entre a PUCRS, empresas brasileiras e alemãs e o SENAI-RS. Localizado no Prédio 30 da Faculdade de Engenharia, o Centro conta com infraestrutura para geração de energia solar e eólica, aquecimento de água via coletores térmicos e sistemas supervisórios para monitoramento e visualização dos dados.

O arranjo fotovoltaico estudado, conforme Figura 3. É composto por cinco módulos fotovoltaicos HT72-156P da Shanghai Aerospace Automobile Electromechanical (HT-SAAE), de características elétricas presentes na Figura 4, conectados em série.

Figura 3: SFCR do CEDER. O Autor.

Module	HT72-156P / HT72-156P(V)					
Maximum Power at STC(Pmax)	325W	330W	335W	340W	345W	350W
Open-Circuit Voltage(Voc)	46.0	46.2	46.4	46.6	46.8	47.1
Short-Circuit Current(Isc)	9.30	9.40	9.52	9.62	9.71	9.79
Optimum Operating Voltage (Vmp)	37.3	37.6	37.9	38.2	38.5	38.8
Optimum Operating Current(Imp)	8.73	8.79	8.86	8.92	8.98	9.04
Module Efficiency	16.7%	17.0%	17.3%	17.5%	17.8%	18.0%
Power Tolerance	0 ~ +5W					
Maximum System Voltage	1000V / 1500V DC(IEC)					
Maximum Series Fuse Rating	15A					
Operating Temperature	-40 ℃ to + 85 ℃					

*STC:Irradiance 1000W/m², module temperature 25, AM=1.5
Optional black frame or white frame module according to customer requirements

Figura 4: *Datasheet* do Módulo Fotovoltaico. [3].

O sistema apresentado encontra-se interligado a um inversor de frequência com

potência nominal de 2 kW, modelo UNO-DM-2.0-TL-PLUS, fabricado pela empresa ABB/FIMER. Este é responsável pela conversão da energia gerada em corrente contínua para alternada, de forma a possibilitar sua integração à rede elétrica ou seu aproveitamento local. Logo, é possível visualizar a configuração do arranjo fotovoltaico por meio do diagrama unifilar de energia na Figura 5. Os módulos fotovoltaicos estão interligados em série, compondo uma única *string*.

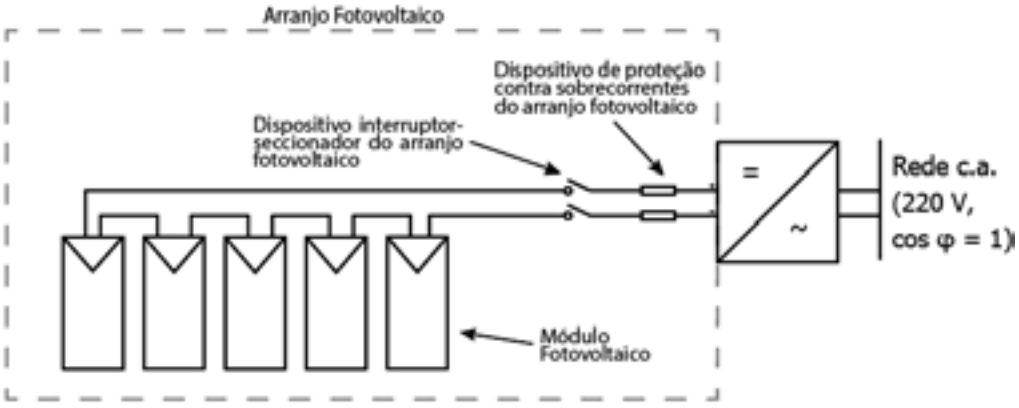


Figura 5: Diagrama Unifilar do SFCR do CEDER. O Autor.

Tendo em vista que o presente estudo foi conduzido em um ambiente acadêmico, o CEDER é inserido em uma cadeia contínua de pesquisas e atividades científicas. Nesse contexto, a análise do sistema em questão compartilhou recursos e infraestrutura com um trabalho de doutorado envolvendo a CC de entrada no inversor fotovoltaico. Como consequência, verificaram-se conflitos operacionais que resultaram na perda parcial de dados registrados, uma vez que interrupções na injeção de energia se tornaram necessárias, conforme ilustrado na Figura 6.

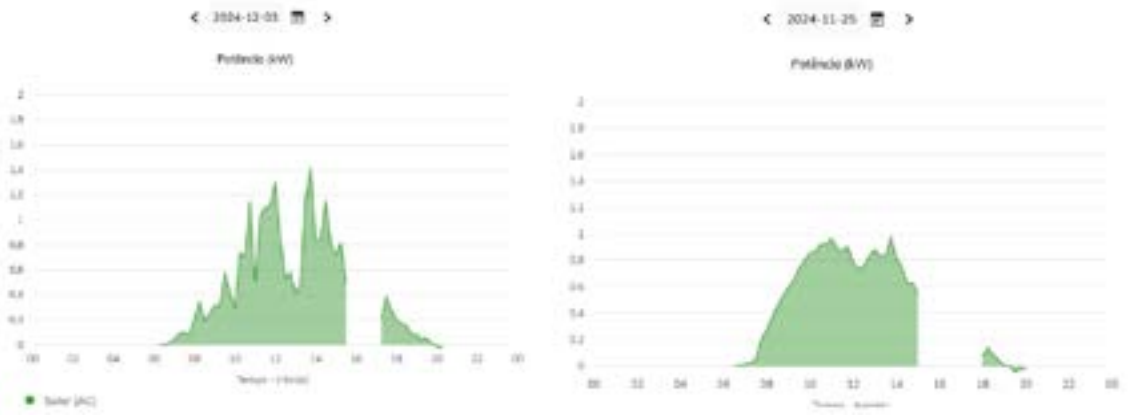


Figura 6: Exemplos de Perdas Parciais Causadas por Interrupções na Injeção de Energia. O Autor.

Ademais, o Centro de Demonstração se encontra em processo de reformas estruturais, o que implica em um aumento significativo nos índices de sujidade dos módulos fotovoltaicos, bem como na formação de sombreamentos mais complexos e imprevisíveis. Tais condições impactam negativamente no desempenho do sistema, resultando em perdas na eficiência do processo de conversão da energia solar em energia elétrica.

Com o intuito de mitigar os efeitos das interferências externas sobre os resultados obtidos, optou-se, neste estudo, por adotar duas estratégias complementares: Em primeiro plano, constituiu-se um tratamento estatístico sob os

resultados aferidos, afim de aproximar os valores obtidos de um cenário sem perturbações externas; Em segundo plano, decidiu-se pela utilização como base confiável de dados, as aferições entre novembro e dezembro de 2024 por conterem informações mais confiáveis e constantes de baixa interferência física em relação aos demais meses.

O tratamento mencionado foi conduzido por meio da substituição dos dias em que houve interferências operacionais, pelos dias que não tiveram. Dessa forma, comparou-se, os valores estimados de energia mensalmente durante o período de um ano entre os diferentes métodos já apresentados. Entretanto, em relação aos dados registrados pelo inversor, se utilizará as informações inerentes aos meses de novembro e dezembro devido às particularidades do Centro. Ademais, parâmetros como erros percentuais serão usados na análise.

Afim de proporcionar uma representação visual clara da metodologia dos processos aplicada a esse estudo, elaborou-se um fluxograma sintetizando as etapas executadas, de acordo com a Figura 7.

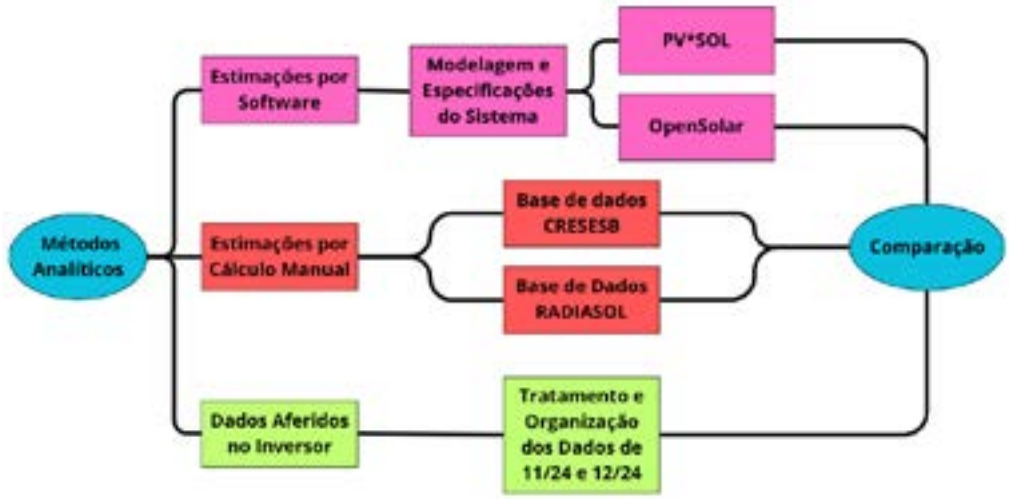


Figura 7: Fluxograma do Processo Metodológico. O Autor.

4. RESULTADOS

Os experimentos realizados possibilitaram avaliar, de forma abrangente, o desempenho do sistema proposto em diferentes cenários. Assim, os resultados obtidos foram organizados em quatro etapas principais:

- Modelagem do sistema em diferentes softwares e organização dos dados;
- Estimação via cálculo com diferentes bases de irradiação mensal;
- Tratamento dos dados aferidos no SFCR do CEDER;
- Comparação e análise dos resultados.

4.1 MODELAGEM DO SISTEMA EM DIFERENTES SOFTWARES

Inicialmente, o sistema foi modelado no software comercial PV*SOL. Em seguida, utilizou-se o software gratuito OpenSolar, visando reproduzir, com o máximo de fidelidade possível, a estrutura física do estudo. As representações obtidas em cada plataforma podem ser observadas, respectivamente, na Figura 8.

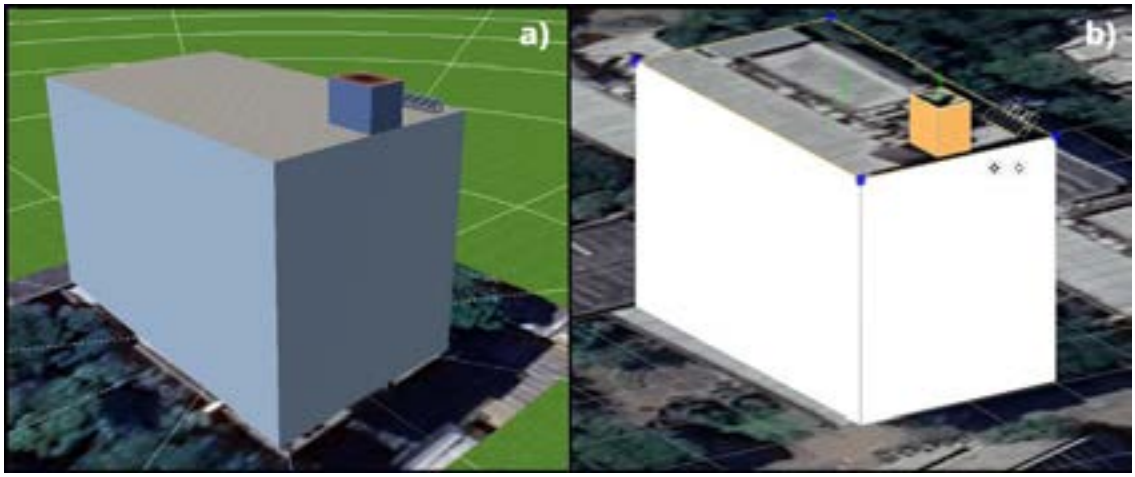


Figura 8: Modelamento da Estrutura Física do CEDER, sendo: (a) PV*SOL e (b) Opensolar. O Autor.

Com a estrutura devidamente modelada, tornou-se possível comparar os resultados estimados, mantendo constantes as condições de perdas, potência, horário e demais características do sistema. Esses dados podem ser vistos na Tabela 1.

Tabela 1: Comparação dos Resultados Mensais nos Diferentes Softwares (kWh).

Meses	OpenSolar	PV*SOL
Janeiro	201,50	234,30
Fevereiro	176,40	205,30
Março	182,70	203,50
Abril	168,00	184,90
Maio	161,20	174,90
Junho	135,00	121,40
Julho	148,80	149,10
Agosto	170,50	179,00
Setembro	168,00	177,60
Outubro	192,20	205,30
Novembro	186,00	226,50
Dezembro	189,10	252,50

4.2 ESTIMAÇÃO VIA CÁLCULO COM DIFERENTES BASES DE IRRADIAÇÃO MENSAL

Com base na Equação 2, os resultados foram obtidos a partir de diferentes bases de dados de irradiação, considerando uma Taxa de Desempenho de 76%, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2: Estimação Mensal pela Equação 2 com Diferentes Bases de Irradiação em kWh.

Meses	Base RADIASOL	Base CRESESB
Janeiro	234,80	234,80
Fevereiro	166,10	202,81
Março	172,03	187,91
Abril	147,03	169,56
Maio	114,84	138,12
Junho	92,04	117,24
Julho	111,29	129,44
Agosto	131,02	151,93

Setembro	155,43	148,18
Outubro	206,79	189,82
Novembro	229,90	223,41
Dezembro	256,11	239,54

4.3 TRATAMENTO DOS DADOS AFERIDOS NO SFCR DO CEDER

Conforme descrito na metodologia, os dados foram tratados com o objetivo de aproximá-los de uma situação real de operação do sistema. A partir do método aplicado, obtiveram-se as seguintes condições, apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3: Resultados do Inversor com Tratamento nos Dados Aferidos (em kWh).

Meses	Média Mensal Com Interf.	Média Mensal Sem Interf.	Energia Registrada	Energia com Tratamento	Modificações de dados (dias)
nov/24	5,32	6,37	159,69	191,24	11
dez/24	6,93	7,23	214,87	224,13	8

Através do estudo e, consequentemente dos dados obtidos, foi possível elaborar um gráfico que proporciona uma melhor visualização comparativa entre os diferentes métodos analisados, evidenciado na Figura 9, bem como a Tabela 4. Nesse aspecto, os meses anteriores a novembro de 2024, são delimitados como Não Aplicáveis (NA), conforme abordado na metodologia.

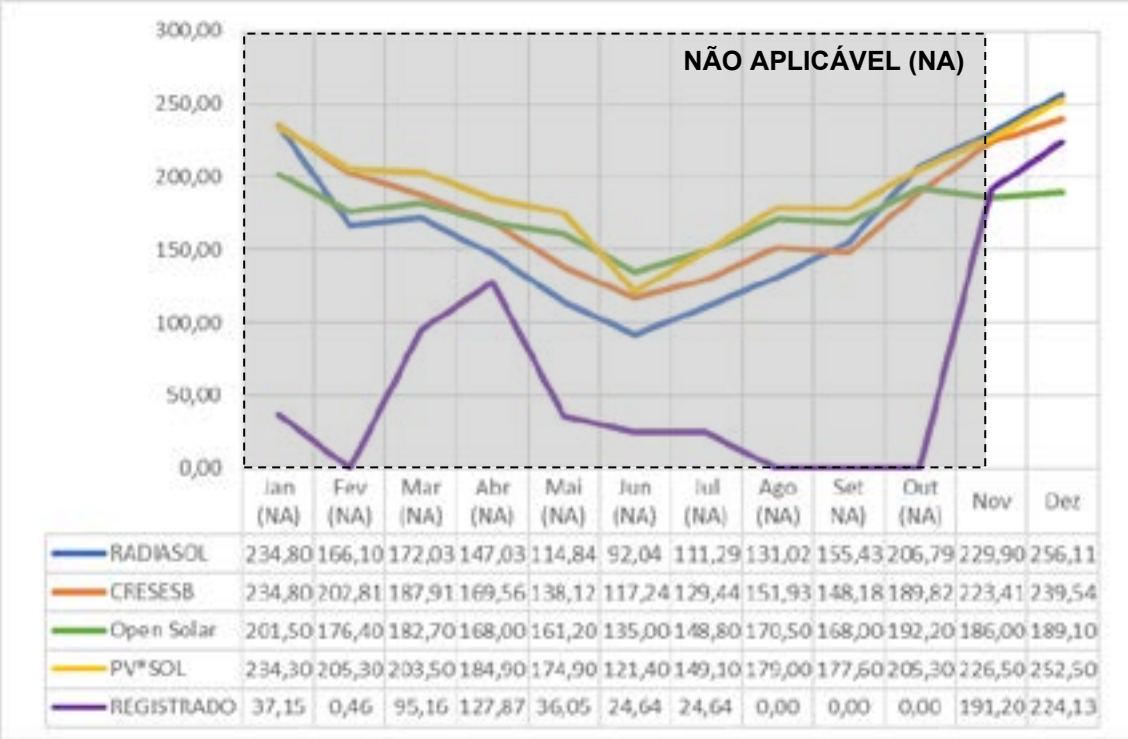


Figura 9: Gráfico Comparativo entre as Diferentes Bases de Resultados em kWh. O Autor.

Tabela 4: Erro Percentual entre as Bases de Dados e os Valores Registrados (%).

Base de Dados	Novembro de 2024	Dezembro de 2024
RADIASOL	20,24	14,27
CRESESB	16,85	6,88

OpenSolar	-2,72	-15,63
PV*SOL	18,46	12,66

A análise comparativa dos resultados obtidos demonstra que, para os meses de novembro e dezembro de 2024, a base OpenSolar apresentou, em novembro, a estimativa mais próxima dos dados registrados, com um erro de apenas -2,72%, indicando uma leve subestimação. No entanto, essa proximidade não se manteve em dezembro, quando o método apresentou um desvio mais acentuado, de -15,63% (também subestimado). Já a base CRESESB apresentou um comportamento mais estável e consistente, com erros de 16,85% em novembro e 6,88% em dezembro, evidenciando maior confiabilidade geral. As bases RADIASOL e PV*SOL exibiram erros semelhantes, variando entre 12% e 20% nos dois meses.

No contexto do RADIASOL, por se tratar de uma base de dados que utiliza modelagens matemáticas para a geração das informações, o maior percentual de erro observado pode ser atribuído às limitações e aproximações inerentes aos cálculos empregados, uma vez que mesmo métodos matemáticos consolidados apresentam divergências em relação a medições reais [16]. Por outro lado, a discrepância observada na fonte PV*SOL pode estar relacionada a ajustes realizados na configuração do sistema no software, que possui um elevado número de parâmetros ajustáveis. No presente trabalho, optou-se por realizar apenas os ajustes estritamente necessários, a fim de garantir uma avaliação equitativa entre as diferentes fontes de dados.

Para possibilitar uma comparação em maior escala temporal, optou-se por analisar as diferentes bases de dados excluindo os resultados aferidos no CEDER, conforme as delimitações previamente estabelecidas. As informações correspondentes estão apresentadas nas Tabelas 5 e 6.

Tabela 5: Estimação Anual e Média Anual para Diferentes Bases (kWh).

Base de Dados	Estimação Anual (kWh)	Energia Mensal (kWh) - Média Anual
RADIASOL	2017,39	168,12
CRESESB	2132,77	177,73
OpenSolar	2079,40	173,28
PV*SOL	2314,30	192,86

Tabela 6: Diferença em Relação à Energia Mensal obtida da Média Anual (%).

Meses	RADIASOL	CRESESB	OpenSolar	PV*SOL
Janeiro	39,67	32,11	16,28	21,49
Fevereiro	-1,20	14,11	1,80	6,45
Março	2,33	5,73	5,43	5,52
Abril	-12,54	-4,60	-3,05	-4,13
Maio	-31,69	-22,29	-6,97	-9,31
Junho	-45,25	-34,03	-22,09	-37,05
Julho	-33,80	-27,17	-14,13	-22,69
Agosto	-22,07	-14,52	-1,61	-7,19
Setembro	-7,54	-16,63	-3,05	-7,91
Outubro	23,00	6,80	10,92	6,45
Novembro	36,75	25,70	7,34	17,44
Dezembro	52,34	34,78	9,13	30,93

A partir das Tabelas 5 e 6 é possível observar que o PV*SOL possui valor médio estimado de energia mais alto, seguido da base CRESESB, OpenSolar e RADIASOL, respectivamente. Esse fato vai de encontro aos valores observados na Figura 9 e demonstra um comportamento diferente ao longo do ano. Ademais, observa-se que em relação a diferença percentual, ambas as bases possuem um viés sazonal em suas previsões mensais. Em um padrão claro de superestimativa nos meses de verão (como janeiro e dezembro) e subestimativa nos meses de inverno (principalmente de maio a julho). Ao comparar a magnitude dessas variações, a fonte OpenSolar se mostra a mais estável e com menor variação ao longo do período de um ano, enquanto a RADIASOL exibe a maior volatilidade (outliers), com as maiores diferenças percentuais tanto positivos quanto negativos.

5. CONCLUSÃO

Com base na análise comparativa das diferentes metodologias de estimativa da geração de energia fotovoltaica, conclui-se que, embora haja variações relevantes nos resultados, a discrepância entre PV*SOL, RADIASOL e CRESESB (considerando a Equação 2) não se mostra significativa em uma avaliação preliminar. Entretanto, essas variações evidenciam a complexidade de prever com precisão a geração de um sistema fotovoltaico, considerando a diversidade de fatores envolvidos, desde as condições climáticas até, especialmente, as perdas operacionais. Esse cenário ressalta a importância de utilizar modelos que incorporem um detalhamento robusto das condições locais e das especificidades técnicas dos componentes do sistema, sobretudo quando se busca maior confiabilidade nos resultados.

Neste estudo, verificou-se que, mesmo com o objetivo de um detalhamento mais refinado, essa tarefa demanda know-how específico, como evidenciado nos resultados obtidos pelo software pago PV*SOL. Além disso, ferramentas como o OpenSolar, apesar de apresentarem menor variação mensal em relação à média anual, demonstram limitações na consideração de perdas e variáveis operacionais, contribuindo para uma subestimação em comparação com os valores aferidos.

Dessa forma, conclui-se que, para uma visão preliminar da geração fotovoltaica, as bases de dados analisadas cumprem adequadamente seu papel, mesmo com suas especificidades. A aplicação dos métodos de forma simplificada permite que o integrador do sistema avalie rapidamente o potencial fotovoltaico de uma aplicação, fornecendo uma referência estimada de forma ágil para possíveis clientes que possuam pouca ou nenhuma percepção sobre o investimento, além de evitar custos desnecessários com avaliações detalhadas [5]. Contudo, quando se busca uma abordagem mais técnica e detalhada, torna-se essencial que o profissional responsável realize medições precisas dos dados locais, minimizando a dependência de estimativas.

6. REFERÊNCIAS

[1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10899: Energia solar fotovoltaica: terminologia. 5. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2025.

[2] CARNEIRO, R. Energia Solar no Brasil: Reflexões e Novas Perspectivas para 2024. Brasil, 2024.

[3] Electrical Charateristricts. Shanghai Aerospace Automobile Electromechanical CO.,Ltd. China, 2017.

[4] Energia Solar Fotovoltaica no Brasil – Infográfico. ABSOLAR, São Paulo, 2022.

[5] MELO, F. Especialista técnico em energia solar fotovoltaica. ABSOLAR, Brasília, 2018.

[6] HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. Fundamentos de Física - Mecânica - Volume 1. 12. ed. 2023.

[7] HARIRI, Y.N. Sapiens: Uma Breve História da Humanidade. Israel, 2014.

[8] HÉMERY, D.; DEBEIR, J.; DELÉAGE, J. Uma História da Energia. 1993.

[9] MASTERS, G.M. Renewable and Efficient Eletric Power Systems. United States, 2004.

[10] Renewable Energy and Climate Change. IPCC, United Kingdom, 2011. New York, 2011.

[11] ZILLES, R; MACÊDO, W.N.; GALHARDO, M.A.B.; et al. Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica. 2012.

[12] PINHO, J.T.; GALDINO, M.A. (org.). Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. 2. ed. Rio de Janeiro: CEPEL-CRESESB, 2014.

[13] Program Highlights. Valentin Software GmbH. Germany, 2025.

[14] UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL (UFRGS). Laboratório de Energia Solar. Porto Alegre: UFRGS, 2024.

[15] Relatórios de precisão no projeto solar. OpenSolar, United States, 2025.

[16] BOX, G. E. P. Science and Statistics. Journal of the American Statistical Association, v. 71, n. 356, p. 791–799, 1976.

[17] CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA (CRESESB). *Radiação Solar*. 2025.

INOVMAT

3ª Conferência Internacional de Inovação em Materiais e Manufatura

PALESTRAS E TRABALHOS TÉCNICOS
LECTURES & TECHNICAL PAPERS

1 - New materials and processes in production technologies
MARION MERKLEIN (Department of Mechanical Engineering - Institute of Manufacturing Technology, Friedrich-Alexander-Universität, Erlangen-Nürnberg)

2 - Palestra Institucional CREA RS
A Gente Faz Muito Porque a Gente Faz Junto
Fábio Chaves (representante do Presidente do CREA RS)

3 - Manufatura aditiva Laser Powder Bed Fusion para ferramental aço maraging M 300
Gilmar Ferreira Batalha (USP)

4 - Manufatura Aditiva por Arco Elétrico: Efeito do Forjamento a Morno nas Propriedades Mecânicas e Microestruturais em um Consumível de Alta Resistência Mecânica
Carlos Antônio Ferreira, Anderson Daleffe, Henrique Cechinel Casagrande, Gilson De March, Pedro Henrique Menegaro Possamai, Joélson Vieira da Silva, (SATC); Lirio Schaeffer (UFRGS)

5 - Influência do Pentóxido de Nióbio Nanoestruturado na Resistência à Corrosão de Chapas Metálicas durante o Pré-Tratamento por Conversão Química
Influence of Nanostructured Niobium Pentoxide on the Corrosion Resistance of Metal Sheets during Pretreatment by Chemical Conversion
Henrique Cechinel Casagrande (UNISATC – NIONE); Thiago Malagrino e Guilherme Zarur (UFSC); Andre Fernandes e Anderson Daleffe (UNISATC)

6 - Efeito do forjamento a morno sobre a liga AWS A5.28 E110C-G produzida por manufatura aditiva
Effect of warm forging on AWS A5.28 E110C-G alloy produced by additive manufacturing
Joélson Vieira da Silva, Anderson Daleffe, Henrique Cechinel Casagrande (UNISATC); Lirio Schaeffer (UFRGS)

7- Manufatura Aditiva por Deposição a Arco Duplo Arame de Materiais Resistentes a Desgaste: Caracterização Microestrutural
Doble-Wire arc additive manufacturing of wear-resistant materials: Microstructural Characterization.
Jamile Thon Langbehn, Anderson Daleffe, Henrique Cechinel Casagrande, Natan Damian Crozetta, Richard de Medeiros Castro (UNISATC), Lirio Schaeffer (UFRGS)

8 - Biodiversidade Microbiana da Amazônia Azul: Motor da Inovação e Sustentabilidade em Materiais
The Blue Amazon's Microbial Biodiversity: A Driver of Innovation and Sustainability in Materials
Vanessa Ochi Agostini (REGENERA)

9 - Biosens: O caminho de desenvolvimento de sensores para o diagnóstico laboratorial
The Sensor Development Journey for Laboratory Diagnostics
Duane da Silva Moraes e Gabriela Victoria de Mello Jantzch (BIOSENS, Porto Alegre RS)

10 - Impressão 3D Multimaterial
Multi-material 3D Printing
Gabriel Nascimento von Esenwein (FCC - Ciência dos Materiais)

11 - Tubos Poliméricos Flexíveis Impressos em 3D para Aplicações Vasculares
3D-Printed Flexible Polyurethane Tubes for Vascular Applications
Jeanne Louise Fernandes Jesus, Paola Lucchese Schütz, Dihogo Araújo Galdino dos Santos, Maria Eulália Danelon, Eduardo Pereira, Silvio César Perini, Luiz Carlos Bodanese, Carlos Alexandre dos Santos, Rosane Angélica Ligabue (PUCRS)

12 - Desenvolvimento e Caracterização de Filmes Poliméricos Obtidos pelo Método CASTING a partir de Fibras de Colágeno Bovino
Developmet and Characterization of Polymeric Films obteined by the CASTING Method from Bovine Collagen Fibers
Larissa Madrid, Patrice Monteiro de Aquim (Universidade Feevale – Novo Hamburgo RS)

13 - Efeito do processamento termomecânico na distribuição de contornos de grão característicos e nas propriedades mecânicas de aços inoxidáveis biomédicos.
Effect of Thermomechanical Processing on the Distribution of Characteristic Grain Boundaries and the Mechanical Properties of Biomedical Stainless Steels
Rafaella Martins Ribeiro (COPPE/UFRJ)

14 - Impacto da IIoT nas Fábricas Inteligentes para o Controle e Correção das Características dos Produtos
Impact of IIoT on Smart Factories for Product Characteristics Control and Correction
Julietty Barreto Maia de Morais, Lirio Schaeffer, Roderval Marcelinoa (UFSC / UFRGS)

15 - Influência da rota de fabricação no desempenho de ferramentas de conformação a frio.
Influence of manufacturing route on the performance of cold forming tools.
Fabio Antonio Xavier, Fernando Moreria Bordin, Sara Diaz Builes (UFSC)

16 - A Evolução do Grafeno nas Aplicações em Materiais Avançados
The Evolution of Graphene in Advanced Material Applications
Thuany Garcia Maraschin (PUCRS)

17 - Desenvolvimento de processos de junção pontual por atrito mistura
FSSW friction stir spot welding
Gilmar Ferreira Batalha (USP)

18 - Um modelo constitutivo do efeito TWIP no aço austenítico 316 LV: separando os efeitos de escorregamento de discordâncias, backstress e maclação mecânica
A constitutive model of the TWIP effect in a 316 LV austenitic stainless steel: decoupling dislocation glide, back stress and mechanical twinning
Andrea Madeira Kliauga, Diogo P. Braga, Carlos A. D. Rovere, Danielle. C. C. Magalhães (DEMa – UFSCar); Leonardo M. Correa (DEMec- UFSCar); Osvaldo M. Cintho (UEPG

19 - Análise Numérica da Influência da Geometria de Fissuras na Camada de Óxido durante a Soldagem em Estado Sólido por Compressão
Numerical Analysis of the Influence of Oxide Layer Crack Geometry on Solid-State Welding by Compression
Brenick Resende Assumpção, Adriano Amâncio Trajano, Olavo Carvalho Haase, Paulo Roberto Cetlin e Maria Teresa Paulino Aguilar (UFMG)

20 - Influência da Tensão de Tração-Compressão nos Efeitos TRIP e TWIP em um Aço Inoxidável Austenítico 201LN
The Role of Tension-Compression Stress on TRIP and TWIP effects in a 201LN Austenitic Stainless Steel
Diogo Pedrino Braga, Danielle Cristina Camilo Magalhães, Carlos Alberto Della Rovere, José Benaque Rubert, Andrea Madeira Kliauga (UFSCAR)

21 - Desenvolvimento de uma ferramenta de corte de alta performance combinando as técnicas de metalurgia do pó e Canister Damascus
Development of a High-Performance Cutting Tool Combining Powder Metallurgy and Canister Damascus Technique
Airton Rodrigues da Rosa, Diego Pacheco Wermuth, André Rosiak e Lirio Schaeffer (UFRGS)

22 - Looking inside porous activated supercapacitor electrodes
Fernando Gabriel Benitez Jara (UNA – Assunção Paraguai)

23 – Influência da nanoalumina nas propriedades físico-químicas de pastas de cimento classe G para poços de petróleo destinadas ao armazenamento geológico de carbono
Influence of nanoalumina on the physico-chemical properties of class G cement pastes for oil wells applied to geological carbon storage
Eleani Maria da Costa, Caroline Brune, Giovanni dos Santos Batista (PUCRS)

24 - Influência da Profundidade de Camada Nitretada na Adesão do Revestimento CrN/CrAlTiN via PAPVD em Aço Ferramenta AISI H13
AISI H13 Tool Steel
João Vitor Piovesan Dalla Nora, Leandro Bettoni Ortega, Felipe Canal, Vinicius Waechter Dias, Alexandre da Silva Rocha (UFRGS)

25 - Influência do álcool polivinílico (PVA) como space holder na porosidade de eletrodos sinterizados por metalurgia do pó
Influence of polyvinyl alcohol (PVA) as a space holder on the porosity of sintered electrodes produced by powder metallurgy
Willian Delfim da Silva, Clayton André Oliveira da Motta, Lirio Schaeffer (CBCM / UFRGS)

TRABALHOS EM PÔSTER

1 - Determinación de la nucleación de dislocaciones en el silicio a partir de la solidificación en diferentes direcciones mediante dinámica molecular
Determination of Dislocation Nucleation in Silicon During Solidification Along Different Crystallographic Directions Using Molecular Dynamics
Matias Gonzalez (Universidad Nacional de Asunción – Facultad Politécnica – San Lorenzo, Paraguay), Fernando Benitez (IPEN – São Paulo SP)

2 - Análise de Desempenho Tribológico de Lubrificantes em um Ensaio Esfera-Sobre-Placa em um Tribômetro de Movimento Recíproco
Tribological Performance Analysis of Lubricants in a Ball-on-Plate Test in a Reciprocating Tribometer
Diego Ellwanger, Régis Henrique da Silva Souza, Ney Francisco Ferreira, Alice do Amaral Rodrigues, Germano Lasch, Liu Yesukai de Barros, Patric Daniel Neis (UFRGS)

3 - Avaliação do Desgaste do Eixo do Mancal da Ferramenta para uma Esquadradora de Porcelanato: um Estudo de Caso
Julio Ricardo de Aguiar, Richard de Medeiros Castro, Jamile Thon Langbehn, Clauber Roberto Melo Marques, Luiz Carlos de Cesaro Cavaler (UNISATC)

4 - Desenvolvimento e Caracterização de Estruturas em Aço Baixo Liga Produzidas por WAAM.
Development and Characterization of Low Alloy Steel Structures Produced by WAAM.
Aline Cipriano, Anderson Daleffe, Jovani Castelan (UNISATC); Henrique Cechinel Casagrande (UFSC); Gilson de March, Joélson Vieira da Silva, Célia de Fraga Malfatti (UFRGS)

5 - Estudo dos parâmetros de roleteamento na obtenção de estruturas gradiente com refino de grão por maclação mecânica no aço inoxidável austenítico 316LV
Study of Roller Burnishing Parameters for Obtaining Gradient Structures with Grain Refinement via Mechanical Twinning in Austenitic Stainless Steel 316LV
Andrea Madeira Kliauga, Danielle C. C. Magalhães (DEMa – UFSCar); Daniel dos Reis Campofiorito, Pedro Vinicius dos Santos, Renato G. Jasinevicius, Luciana Monatari (EESC- USP)

6 - Avaliação Tribológica de Emulsão Biodegradável à Base de Óleo Vegetal via MQL em Ensaio Pino-sobre-Disco
Tribological Evaluation of a Biodegradable Emulsion Based on Vegetal Oil Applied via MQL in a Pin-on-Disc Test
Alice do Amaral Rodrigues; Régis Henrique Silva Souza, Guilherme Vargas Schirmer, André João Souza, Germano Lasch, Liu Yesukai de Barros, Paola Stradolini, Cesar Liberato Petzhold, Ney Francisco Ferreira, Patric Daniel Neis (UFRGS)

7 - Caracterização e aplicação de biossorvente a partir do bagaço de uva branca
Characterization and application of biosorbent from white grape bagasse
Bethania Brochier, Alexandra Piaia (UNISINOS – São Leopoldo RS)

8 - Compostos voláteis produzidos durante a fermentação espontânea e controlada do Cacau Criollo
Volatile Compounds Produced During Spontaneous and Controlled Fermentation of Criollo Cacao
Diner Mori Mestanza, Vanessa Barbieri Xavier, Victor Hugo Silva Rodrigues, Rubem Mário Figueiró Vargas, Eduardo Cassel (PUCRS)

9 - Simulação do Escoamento e Transferência de Calor em Meios Porosos com o Método Lattice Boltzmann
Simulation of Flow and Heat Transfer in Porous Media with the Lattice Boltzmann Method
Henrique Martins Tavares, Eduardo Cassel, Rubem Mário Figueiró Vargas (PUCRS)

10 - Cálculo de propriedades para o equilíbrio sólido-líquido preditivo voltado a produtos naturais
Predictive Property Calculation for Solid–Liquid Equilibrium Applied to Natural Products
Juan José Mora Fajardo, Rubem Mário Figueiró Vargas, Eduardo Cassel (PUCRS)

11 - Desenvolvimento de Biofilmes à Base de Quitosana Incorporados com Microcristais de Celulose
Development of Chitosan-Based Biofilms Incorporated with Cellulose Microcrystal
Cristiane Krause Santin, Thais Henz Paim de Almeida (Universidade do Vale dos Sinos UNISINOS – São Leopoldo RS)

12 - Avaliação das propriedades de superfície de filmes de polipropileno biorientado após tratamento por chama
Evaluation of the surface properties of biaxially oriented polypropylene films after flame treatment
Luan Souza da Silveira, Jessica Pereira Pires, Marçal José Rodrigues Pires, Rosane Angelica Ligabue (PUCRS)

44º SENAFOR

28th International Forging Conference
13th International Sheet Metal Forming Conference / 10th BrDDRG Congress
13th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies – Brazil/RS
2nd International Conference on Innovation in Materials and Manufacturing
Hotel Plaza São Rafael – P. Alegre RS, October 1-3, 2025

MANUFATURA ADITIVA POR ARCO ELÉTRICO: EFEITO DO FORJAMENTO A MORNO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E MICROESTRUTURAIS EM UM CONSUMÍVEL DE ALTA RESISTÊNCIA MECÂNICA

Carlos Antônio Ferreira[1]
Lirio Schaeffer[2]
Anderson Daleffe[3]
Henrique Cechinel Casagrande[4]
Gilson De March[5]
Pedro Henrique Menegaro Possamai[6]
Joélson Vieira da Silva[7]

[1]Doutorando em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais (PPGE3M). E-mail: carlos.ferreira@satc.edu.br
[2] Professor da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. E-mail: schaefer@ufrgs.br
[3] Doutor em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Criciúma, Santa Catarina, Brasil. E-mail: anderson.daleffe@satc.edu.br
[4] Doutorando em Engenharia Metalúrgica. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, Santa Catarina, Brasil. E-mail: henrique_cechinel@hotmail.com
[5] Doutorando em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais (PPGE3M). E-mail: gilson.march@satc.edu.br
[6] Mestrando em Engenharia Metalúrgica. Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina (UniSATC). Criciúma, Santa Catarina, Brasil. E-mail: pedro.possamai@hotmail.com
[7] Doutorando em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais (PPGE3M). E-mail: joelson.silva@satc.edu.br

RESUMO

A manufatura aditiva por arco elétrico (WAAM – *Wire Arc Additive Manufacturing*) tem se destacado como uma alternativa promissora para a fabricação de componentes metálicos de grande porte, especialmente com ligas de alta resistência mecânica. Este trabalho investiga o efeito do forjamento a morno nas propriedades mecânicas e microestruturais de peças produzidas via WAAM utilizando um consumível de alta resistência. Foram fabricados corpos de prova por deposição em múltiplas camadas, seguidos por processos de forjamento a temperatura de 850 ºC, com o objetivo de refinar a microestrutura e reduzir defeitos típicos do processo, como porosidade e crescimento direcional de grãos. Ensaios mecânicos, incluindo tração e dureza, além de análises microestruturais por microscopia óptica e eletrônica, foram conduzidos. Os resultados indicam que o forjamento a morno promove significativa homogeneização microestrutural, e melhora nas propriedades mecânicas, em especial o limite de escoamento e a tenacidade. Assim, a combinação de WAAM com forjamento térmico intermediário revela-se uma estratégia eficiente para elevar a qualidade e o desempenho de componentes críticos fabricados por manufatura aditiva com consumíveis de alta resistência.

1. Introdução

A manufatura aditiva, especialmente a impressão 3D aplicada a metais, tem se consolidado como uma das tecnologias de maior relevância dentro do conceito de Indústria 4.0. Em um cenário de elevada competitividade e busca constante pela redução de custos com o menor consumo possível de insumos, a adoção de soluções inovadoras tornou-se estratégica para a indústria.

Entre os principais diferenciais dessa tecnologia estão a possibilidade de integrar diferentes funções em um único componente, a produção de geometrias complexas sob medida, a redução da massa estrutural, o aproveitamento mais eficiente da matéria-prima e a diminuição significativa do tempo de fabricação [1,2,3]. Além disso, a manufatura aditiva é amplamente utilizada na prototipagem de peças com formatos não convencionais [4].

Quando combinada ao forjamento a quente em processos de caráter híbrido, a manufatura aditiva possibilita reduzir etapas de pré-forma e de operação, além de aumentar a eficiência no uso do material. Conforme destacado em [5], aproximadamente metade do custo de um componente forjado está diretamente relacionado ao gasto com matéria-prima, além do benefício da diminuição expressiva no tempo de setup, já que o processo requer apenas uma matriz.

Os resultados preliminares obtidos neste trabalho demonstram que a combinação entre manufatura aditiva e forjamento apresenta vantagens tanto econômicas quanto ambientais, principalmente pelo menor consumo de recursos. Nesse contexto, a técnica WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing), que utiliza soldagem a arco com alimentação de arames metálicos, tem ganhado destaque. Embora esteja mais frequentemente associada ao processo GMAW (Gas Metal Arc Welding), essa abordagem também pode ser implementada com GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) e PAW (Plasma Arc Welding) [6].

As principais vantagens do WAAM incluem o baixo custo de implantação, a ampla disponibilidade de arames metálicos no mercado e as elevadas taxas de deposição, variando entre 5 e 6 kg/h, valores bem superiores aos obtidos em processos como SLM (*Selective Laser Melting*), com cerca de 0,1 kg/h, e LMD (*Laser Metal Deposition*), em torno de 1 kg/h.

O forjamento, por outro lado, é um método de conformação plástica de uso consolidado na indústria, especialmente na produção de carcaças, eixos e componentes automotivos, devido à sua capacidade de gerar peças com alta resistência mecânica e excelente tenacidade. O processo também é eficaz na

eliminação de defeitos internos e na melhoria das propriedades do material [7]. O uso de matrizes fechadas, típico dos setores automotivo e aeroespacial, é justificado pela necessidade de confiabilidade e precisão, especialmente em peças críticas como bielas e eixos [8].

Neste estudo, investigam-se os efeitos do forjamento a morno na microestrutura de martelos produzidos por WAAM com a liga de alta dureza UTP DUR 600. O propósito central é integrar de maneira otimizada essas duas tecnologias e avaliar a influência da orientação de impressão sobre as propriedades mecânicas. A sinergia entre a manufatura aditiva e o forjamento a morno busca elevar o desempenho e a qualidade dos componentes, favorecendo sua aplicação em diferentes setores industriais e ampliando os impactos positivos dessa abordagem.

MATERIAIS E MÉTODOS

Na etapa de impressão das amostras, foi realizada primeiramente a análise da estratégia de deposição mais apropriada, levando em conta, como principal critério, os efeitos do escoamento do material fundido decorrentes da alta taxa de calor gerada durante o processo. As peças de teste foram fabricadas em um sistema de soldagem desenvolvido pela UniSATC, adaptado para permitir movimentação nos eixos X, Y e Z sobre uma base automatizada. Esse equipamento é controlado por comando numérico computadorizado, o que possibilita o ajuste linear da altura da tocha, garantindo maior precisão e regularidade na deposição sucessiva das camadas.

Para a execução da soldagem, empregou-se o modelo semiautomático SMASHWELD 250E, fabricado pela ESAB, ilustrado na Fig. 1. Esse dispositivo utiliza a tecnologia de soldagem MIG/MAG, sendo escolhido, neste estudo, o processo MAG (Metal Active Gas), por apresentar maior compatibilidade com as propriedades da liga utilizada e com os objetivos experimentais definidos.

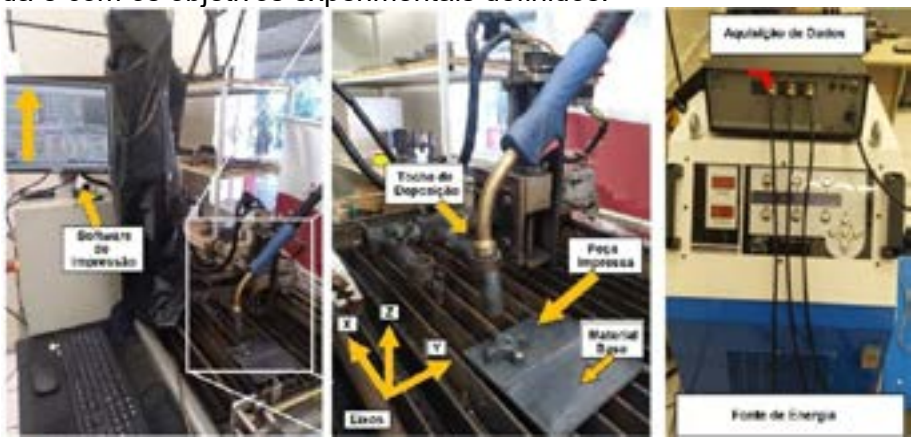


Figura 1: Arranjo do equipamento durante a impressão das amostras.

A impressão de material iniciou-se na periferia e, finalizou no centro da peça, conforme Fig. 2a. Nas Fig. 2b, 2c e 2d, podemos observar o formato da pré-forma.

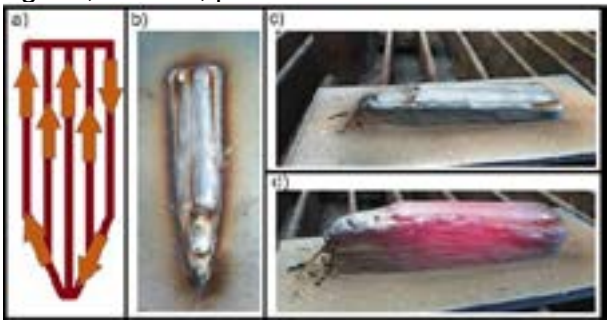


Figura 2: Pré-forma impressa (a e b), camadas depositadas (c e d).

A etapa de conformação mecânica foi conduzida em uma prensa hidráulica,

modelo fabricado pela empresa FKL – Máquinas Hidráulicas, aplicando-se uma carga de 100 toneladas sobre o molde disponibilizado pela UNISATC, conforme mostrado na Fig. 3. Antes do início do forjamento, as amostras passaram por um aquecimento prévio até atingir 850 °C. Durante a operação, monitoraram-se continuamente as temperaturas tanto da peça quanto da matriz, possibilitando o registro em tempo real das variações térmicas e a coleta de informações mecânicas relevantes para a análise do comportamento do material ao longo do processo de conformação.

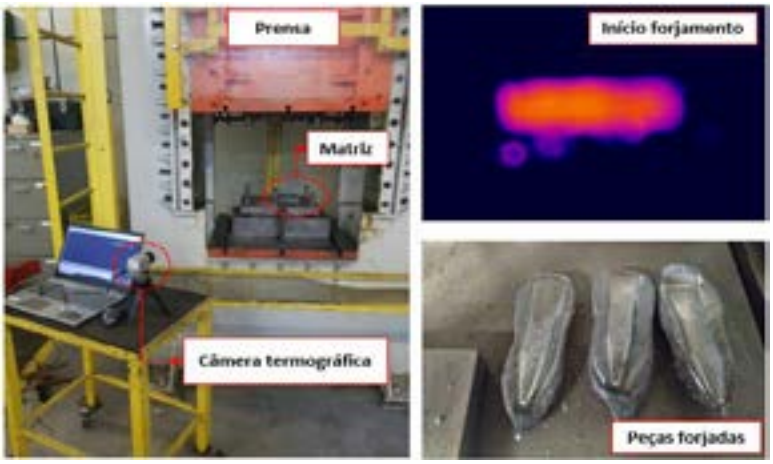


Figura 3: Forjamento a quente das pré-forma fabricadas em MA

O ensaio de tração foi realizado em uma máquina universal INSTRON®, modelo 8801, apresentada na Fig. 4, e seguiram as diretrizes estabelecidas pela norma ABNT ISO 6892:2024, com a execução dos testes a 850 °C (± 5 °C) e tempo de encharque de 10 minutos. As amostras foram avaliadas em três orientações diferentes (0°, 45° e 90°), aplicando-se a carga com velocidade controlada de 5 mm/min.

Figura 4: Máquina de ensaio de tração a temperaturas elevadas

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise Química

Após a fabricação das pré-formas pelo processo de manufatura aditiva (MA), uma amostra foi selecionada para análise por espectrometria de emissão óptica. Essa técnica possibilitou determinar a composição química do material em diferentes camadas depositadas. Os resultados obtidos estão apresentados na Tab. 1, juntamente com os valores de referência disponibilizados pelo fabricante.

Table 1: Composição química do material estudado e indicado pelo fabricante.

Material	C	Mg	Si	Cr	Mo	Mn	Ni
DIN 8555 E6-UM-60	0,60		0,60	6,80	0,50	0,70	
Amostra	0.562	1.084	0,966	5.714	0,597		0,047

3.2 Análise Térmica

O monitoramento térmico no processo de forjamento foi conduzido nas direções longitudinal, oblíqua e transversal das amostras. Os valores de temperatura registrados nas pré-formas produzidas por manufatura aditiva, assim como os pontos específicos de medição, estão apresentados a seguir. A média de temperatura obtida foi de 766 °C, conforme ilustrado na Fig. 5.

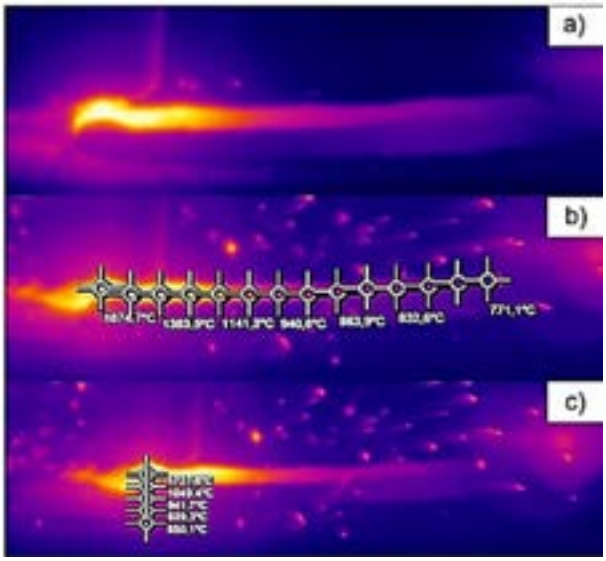


Figura 5: Análise termográfica da pré-forma

No decorrer da manufatura aditiva, foi realizada a análise térmica durante a deposição sucessiva das camadas. Para esse monitoramento, foram estabelecidos 14 pontos distribuídos ao longo da direção longitudinal, com espaçamento de 10 mm entre eles, e outros 5 pontos na direção transversal, separados por intervalos de 5 mm. A Fig. 6 apresenta as curvas características obtidas em cada ponto, evidenciando a variação de temperatura ao longo da formação dos cordões de solda que compõem a pré-forma.

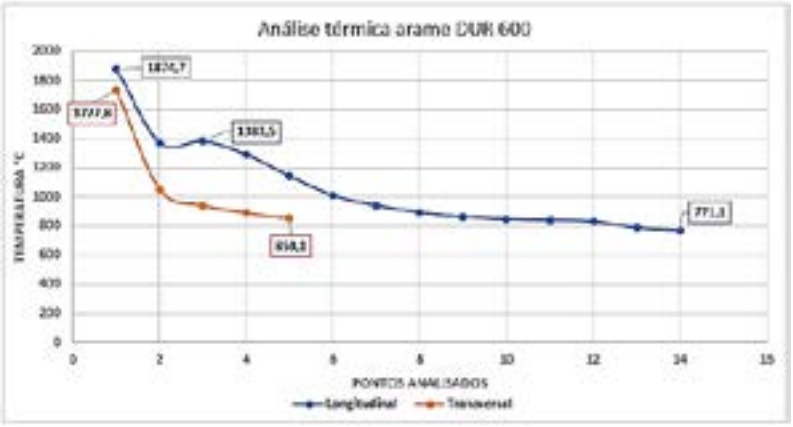


Figura 6: Temperaturas na deposição – Longitudinal x transversal

O arame de solda UTP DUR 600, empregado na fabricação aditiva da pré-forma, apresentou um perfil térmico característico ao longo da deposição das camadas. Verificou-se que, na direção transversal, a variação de temperatura foi mais intensa, acompanhada por um resfriamento acelerado. Esse comportamento está relacionado à maior exposição das extremidades do cordão de solda à atmosfera, favorecendo a dissipação de calor. Já na direção longitudinal, a queda de temperatura ocorreu de

maneira mais lenta, uma vez que a maior distância entre o centro do cordão e o meio externo reduziu a taxa de troca térmica. Esses resultados destacam a influência da geometria e da orientação do cordão de solda na distribuição de calor durante o processo.

3.3 Análise por MEV

A análise por MEV, mostrada na Fig. 7, revela uma superfície irregular, com grãos pouco deformados e regiões de concentração elementar localizada. Esse padrão está associado ao método de deposição, no qual o material atinge a fase austenítica antes de passar por um resfriamento controlado, resultando em uma microestrutura com variação no tamanho dos grãos. Conforme estudos recentes, incluindo Chen *et al.* (2023) [9] e Albannai e León-Henao, esse processo de aquecimento e resfriamento gradual, somado aos ciclos térmicos das camadas posteriores, promove um efeito de recozimento que favorece o crescimento dos grãos.

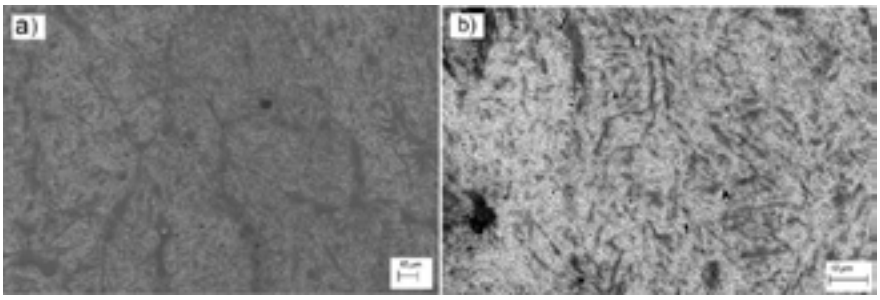


Figura 7: Análise por MEV antes (a) e depois do forjamento (b)

Foram identificadas trincas no material, relacionadas à presença de elementos de liga no arame, em especial o cromo, cuja concentração foi de 5,714% em peso, conforme determinado pela análise de espectrometria. Tais descontinuidades funcionam como mecanismos de alívio das tensões geradas no material durante o processo de soldagem.

3.4 Análise de Microdureza

A Fig. 8 mostra os resultados da análise de microdureza das pré-formas produzidas por manufatura aditiva, antes do forjamento, e das peças após a realização do processo de forjamento. Esses dados permitem caracterizar o comportamento do material ao longo do processo híbrido que combina manufatura aditiva e forjamento.

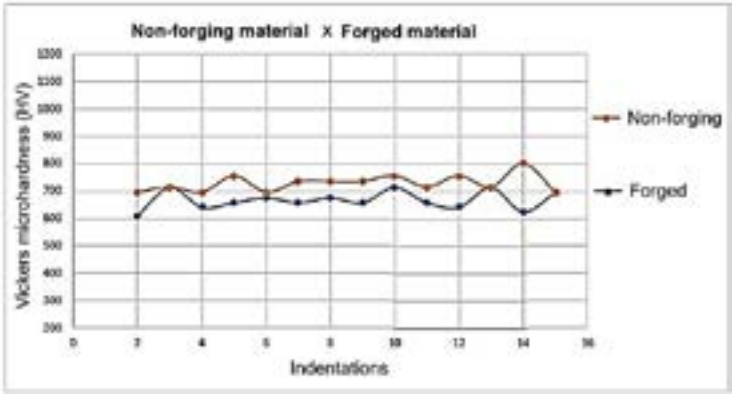


Figura 8: Microdureza Material forjado vs manufatura aditiva.

As amostras obtidas antes do forjamento apresentaram valores de dureza mais

elevados, atribuídos à presença de elementos de liga e ao intenso aporte térmico típico do processo de manufatura aditiva. Durante a deposição, não foram observadas fissuras características da impressão 3D. Com a aplicação do forjamento, a microestrutura evoluiu para uma configuração martensítica clássica, explicando a manutenção de alta dureza.

No processo de manufatura aditiva isolado, a dureza média registrada foi de 729 HV, com desvio padrão de 31 HV. Já no processo híbrido, que integra manufatura aditiva e forjamento, a dureza média foi menor, alcançando 668 HV, com desvio padrão de 33 HV.

3.5 Ensaio de tração a quente

Os ensaios de tração revelaram uma tensão média de 127 MPa para os corpos de prova avaliados na orientação de 0° (Fig. 10a). Na direção de 45°, a tensão média foi de 138 MPa (Fig. 10b), enquanto na orientação de 90° foi registrada a maior resistência, com média de 160 MPa (Fig. 10c).

Quanto à deformação, a direção de impressão mostrou pouca influência, apresentando valores semelhantes nas três orientações, conforme evidenciado na Fig. 9.

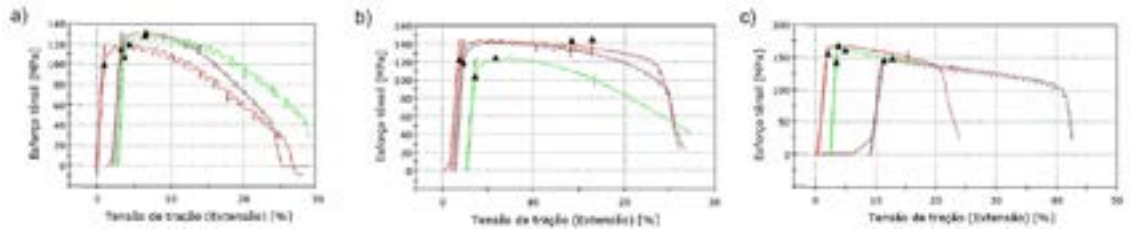


Figura 9: Curvas de tensão x deformação

Com base nos resultados do ensaio, verificou-se que os corpos de prova impressos na direção de 0° apresentaram o melhor desempenho mecânico, combinando elevada resistência à tração com boa ductilidade. Na orientação de 45°, o comportamento foi intermediário, com resistência reduzida, indicando uma anisotropia moderada no material. Por sua vez, na direção de 90°, apesar da maior resistência à tração, o material apresentou comportamento mais frágil, com falhas súbitas observadas em alguns casos.

4. CONCLUSÕES

- A análise da amostra submetida ao forjamento demonstrou uniformidade microestrutural, com distribuição controlada de perlita.
- O processo de forjamento mostrou eficácia na mitigação de imperfeições como poros, trincas e segregações originárias da impressão 3D, além de promover um refinamento da matriz metálica.
- Observou-se redução nos valores de dureza no material processado, atribuível à formação de martensita e à redistribuição dos carbonetos de cromo e molibdênio.
- Detectaram-se traços residuais de fósforo e enxofre, cujas inclusões, mesmo em quantidades reduzidas, podem influenciar propriedades mecânicas como tenacidade conforme o uso final do componente.

- Os testes mecânicos em condições térmicas elevadas evidenciaram variação nas propriedades conforme a orientação de fabricação aditiva, indicando anisotropia.
- Este estudo configura uma primeira abordagem investigativa, sendo sugeridas pesquisas complementares para avaliar diferentes parâmetros térmicos e suas combinações.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Centro Universitário – UNISATC pelo apoio a pesquisa através do uso de sua estrutura de laboratórios, a Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS pelo apoio através do acesso a rede de pesquisadores, e a Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina – FAPESC pelo apoio financeiro na compra de equipamentos e insumos para pesquisa.

REFERÊNCIAS

[1] CODAMA, H., 'Usinagem Brasil'. São Paulo, 2018. Disponível em: <http://www.usinagem-brasil.com.br/13122-um-pouco-da-história-da manufatura-aditiva/pa-5/> Acesso em: 14 agosto 2023.

[2] SATURNO, et. al. Avaliação do Processo de Manufatura Aditiva Baseado na Técnica WAAM a Partir do HL 85 MC-B. Revista Vincci - Periódico Científico do UniSATC, [S. l.], v. 8, n. 1, p. 258–278, 2023.

[3] Silva, J. V. D., Schaeffer, L., Daleffe, A., Milanez, A., Casagrande, H. C., & March, G. D. (2025). Analysis of the Bimetallic Joint of a Hot-Forged Crosshead Composed of ASTM B221 6060 Aluminum and AWS A5. 36 E110C-G M Low Alloy Steel Obtained by Localized Fusion Additive Manufacturing. Materials Research, 28, e20250347.

[4] JACOB, Pedro. Manufatura aditiva de metal, um novo passo para o mercado. LWT sistemas, 2019. Disponível em: <https://www.lwtsistemas.com.br/2019/08/28/manufatura-aditiva-de-metal>. Acesso em: 10 jul. 2023

[5] DOUGLAS, R.; KUHLMANN, D. Guidelines for precision hot forging with applications. Journal of Materials Processing Technology, Amsterdam, v.98, p.182-188, 2000.

[6] TABERNERO, Iván; PASKUALA, Amagoia; ÁLVAREZB, Pedro; SUÁREZCB, Alfredo. Study on Arc Welding processes for High Deposition Rate Additive Manufacturin. CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machinin. Spain.V.68, p.358-362, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827117310363>. Acesso em: 13 jul. 2023.

[7] ALTAN, T.; NGAILE, G.; SHEN, G. Cold and hot Forging: Fundamentals and Applications. ASM International. Ohio. 2005.

[8] GROOVER, M.P. Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems. John Wiley & Sons. 2010SCHÄFER, D.; HIRT, G. Phenomenological microstructure simulation of incremental bulk metal forming using a multi mesh method. Proceedings of the 10th International Conference on Numerical Methods in Industrial Forming Processes – Numiform 2010. Korea, 2010.

[9] Chen, Y., Hao, Z., Li, Y., Liu, C., Liu, Y., Luo, Z., & Ao, S. (2023). Enhancing Mechanical Properties: Exploring the Effect of Annealing Temperature on Wire Arc Additively Manufactured High-Strength Steel. *Materials*, *16*(21), 6969

44º SENAFOR

28ª Conferência Internacional de Forjamento - Brasil
14ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas / 11º Congresso do BrDDRG
14ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis
3ª Conferência Internacional de Inovação em Materiais e Manufatura
Porto Alegre, RS, dias 1, 2 e 3 de outubro de 2025
www.senafor.com

Influência do Pentóxido de Nióbio Nanoestruturado na Resistência à Corrosão de Chapas Metálicas durante o Pré-Tratamento de superfície por Conversão Química

Henrique Cechinel Casagrande (1)
João Batista Rodrigues Neto (2)
Anderson Daleffe (3)
Thiago Malagrino (4)
Guilherme Zarur (5)
Andre Fernandes (6)
Gilson de March (7)

RESUMO

O pré-tratamento de superfície em aço SAE 1015 com H_2ZrF_6 e Nb_2O_5 formou uma camada de conversão homogênea e protetora. Imagens de MEV-FEG mostraram superfície uniforme, com pequenas fendas compatíveis com a reação do ácido. O mapeamento e o EDS revelaram enriquecimento de Nb (32,05 % em massa, 12,56 % em átomos) e Fe (26,27 % em massa), além de O (15,89 %) e P (11,81 %), indicando formação de óxidos e fosfatos superficiais. Pequenas quantidades de K, Na, Ca e C também foram detectadas, refletindo adições ou contaminações da solução. A distribuição de Nb e Zr sugere incorporação eficaz do Nb_2O_5 na camada de conversão. O tratamento nanotecnológico mostra-se eficaz para controle de morfologia e composição química da superfície, promovendo proteção anticorrosiva.

Key words — Pentóxido de nióbio; Nanotecnologia em pré-tratamento de superfície; Molhabilidade em chapas metálicas; Ácido hexafluorzircônio.

(1) Doutorando em Ciência e Engenharia de Materiais- UFSC. E-mail: henrique_cechinel@hotmail.com
(2) Dr. Em Ciência e Engenharia de Materiais – UFSC. E-mail: joao.neto@ufsc.edu.br
(3) Dr. Em Eng. De Minas, Metalurgia e Materiais – UFRGS. E-mail: anderson.daleffe@satc.edu.br
(4) Doutorando em Ciência e Engenharia de Materiais- UFSC. E-mail: Thiago.malagrino@nione.tec.br
(5) Doutorando em Ciência e Engenharia de Materiais- UFSC. E-mail: Guilherme.zarur@nione.tec.br
(6) Graduando em Engenharia Química – UniSATC. E-mail: andre.martinello@nione.tec.br
(7) Doutorando em Eng. Minas, Metalurgia e Materiais – UFRGS. E-mail: gilson.march@satc.edu.br

1. INTRODUÇÃO

Os pré-tratamentos de superfície são amplamente utilizados para promover a aderência de revestimentos e aumentar a resistência à corrosão de metais [1-2]. Entre as técnicas mais tradicionais, destacam-se os processos à base de cromo hexavalente (Cr^{6+}) [3-4] e os fosfatizantes [5-6]. O uso de compostos de cromo hexavalente consolidou-se por décadas devido à sua elevada eficiência na formação de camadas protetoras estáveis e resistentes à corrosão [7]. Da mesma forma, os tratamentos à base de fosfato tornaram-se comuns [8] em setores como a indústria automotiva e de eletrodomésticos [9], pela capacidade de gerar camadas que favorecem a ancoragem de tintas e revestimentos subsequentes. No entanto, apesar da eficácia técnica, ambos os processos apresentam sérias desvantagens ambientais e à saúde humana.

O cromo hexavalente é reconhecido como um agente altamente tóxico, mutagênico e carcinogênico, oferecendo riscos significativos para trabalhadores expostos e para comunidades próximas a áreas industriais [10]. Além disso, os resíduos gerados durante o processo são de difícil tratamento e, quando descartados de forma inadequada, podem contaminar solos e recursos hídricos, causando impactos ambientais duradouros [11-12]. Já os tratamentos à base de fosfato, embora menos agressivos à saúde humana, contribuem para a eutrofização de corpos d'água devido à liberação de íons fosfatados no ambiente, afetando ecossistemas aquáticos e gerando desequilíbrios ecológicos [13][14][15][16].

Diante dessas limitações, surgem alternativas mais sustentáveis impulsionadas pelos avanços da nanotecnologia. Novos pré-tratamentos de superfície vêm sendo desenvolvidos a partir de nanomateriais como óxidos de zircônio [17][18][19] e titânio [20][21][22], ou a junção desses [23], que oferecem propriedades anticorrosivas comparáveis ou superiores às tecnologias convencionais, sem gerar os mesmos passivos ambientais. Esses recobrimentos formam camadas ultrafinas, homogêneas e com elevada reatividade superficial [24], capazes de promover excelente aderência a revestimentos orgânicos [25]. Além disso, a nanotecnologia possibilita o controle preciso da morfologia e da composição química da camada protetora, ampliando a eficiência e a durabilidade do tratamento [26]. Assim, os processos nanotecnológicos emergem como alternativas promissoras, combinando desempenho técnico com menor impacto ambiental e maior segurança para o ser humano.

Neste contexto, será investigada a incorporação do pentóxido de nióbio (Nb_2O_5) em meio ácido de hexafluorzircônio (H_2ZrF_6), visando o desenvolvimento de pré-tratamentos de superfície mais sustentáveis. O Nb_2O_5, em razão de sua elevada estabilidade química e da possibilidade de obtenção de estruturas nanométricas com grande área superficial, tem potencial para atuar como modificador da camada formada pelo H_2ZrF_6, contribuindo para maior homogeneidade e densificação do filme protetor. Essa combinação entre zircônio e nióbio pode resultar em barreiras mais compactas e resistentes à penetração de espécies agressivas, além de favorecer a criação de sítios ativos para a adesão de revestimentos subsequentes. Embora ainda não existam relatos na literatura sobre a utilização do Nb_2O_5 incorporado por imersão em meio de H_2ZrF_6, há trabalhos reportando sua aplicação por rotas distintas, como o método sol-gel [27], os quais demonstram ganhos relevantes na resistência à corrosão. Dessa forma, a investigação proposta representa uma contribuição inédita, posicionando-se como alternativa promissora frente às tecnologias tradicionais baseadas em cromo ou fosfato.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Preparação das amostras

As amostras de aço SAE baixo carbono, com dimensões de 20 × 20 × 2 mm (milímetros), foram preparadas por meio de lixamento progressivo. O processo utilizou lixas de diferentes granulometrias, alcançando até 1200 grãos, a fim de obter uma superfície uniforme e adequada para posterior análise.

2.2 Pré-tratamento de superfície

O pré-tratamento de superfície foi realizado pelo método Dip Coating, garantindo a formação de uma camada uniforme sobre o substrato. As condições do processo foram ajustadas conforme recomendação do fabricante, com pH 4, tempo de imersão de 60 segundos e temperatura controlada a 25 °C. Esse procedimento visou otimizar a adesão e a homogeneidade do revestimento.

2.3 Espectrometria de Emissão Óptica - OES

A caracterização química da chapa utilizada como amostra foi realizada por meio da técnica de Espectrometria de Emissão Óptica (OES). O ensaio foi conduzido em um espectrômetro BRUKER Q2 ION, seguindo os critérios estabelecidos pela norma ASTM E415, com apoio do centro tecnológico da UNISATC. As condições experimentais envolveram uma potência de 200 W (Watts) aplicada durante 30 segundos.

2.4 MEV -FEG e EDS

Após o tratamento de superfície, as amostras foram destinadas à análise em MEV-FEG, com o objetivo de verificar a presença de pentóxido de nióbio depositado na superfície. As caracterizações foram realizadas no microscópio eletrônico de varredura Neo Scope – Modelo JCM-7000, disponível no Laboratório de Tecnologia e Caracterização Mecânica (LATECME) do SENAI Joinville. As imagens foram obtidas utilizando elétrons secundários (SE2) e retroespalhados (BSD), sob tensão de aceleração de 15 kV.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Espectrometria de Emissão Óptica - OES

A Tabela 1 apresenta a composição química do aço carbono empregado neste estudo. Conforme os parâmetros estabelecidos pela norma ASTM A29/A29M, o material analisado corresponde a um aço baixo carbono do tipo SAE 1015.

Tabela 1: Caracterização química.

Elementos:	**(% massa)**	**ASTM A29/A29M [28]**
Carbono (C)	0,146	0,13 - 0,18
Silício (Si)	0,017	-

Manganês (Mn)	0,454	0,3 - 0,6
Fósforo (P)	0,0098	0,04 máx.
Enxofre (S)	0,0096	0,05 máx.
Ferro (Fe)	Bal.	Bal.

3.2 MEV – FEG e EDS

A superfície da Figura 1 apresenta uma morfologia com trincas finas e ramificadas, que geralmente é característica da formação de uma camada de conversão proveniente do pré-tratamento com H_2ZrF_6. Essas trincas ocorrem devido à retração da película durante a secagem, comum em filmes formados por fluoretos de zircônio [29][30].

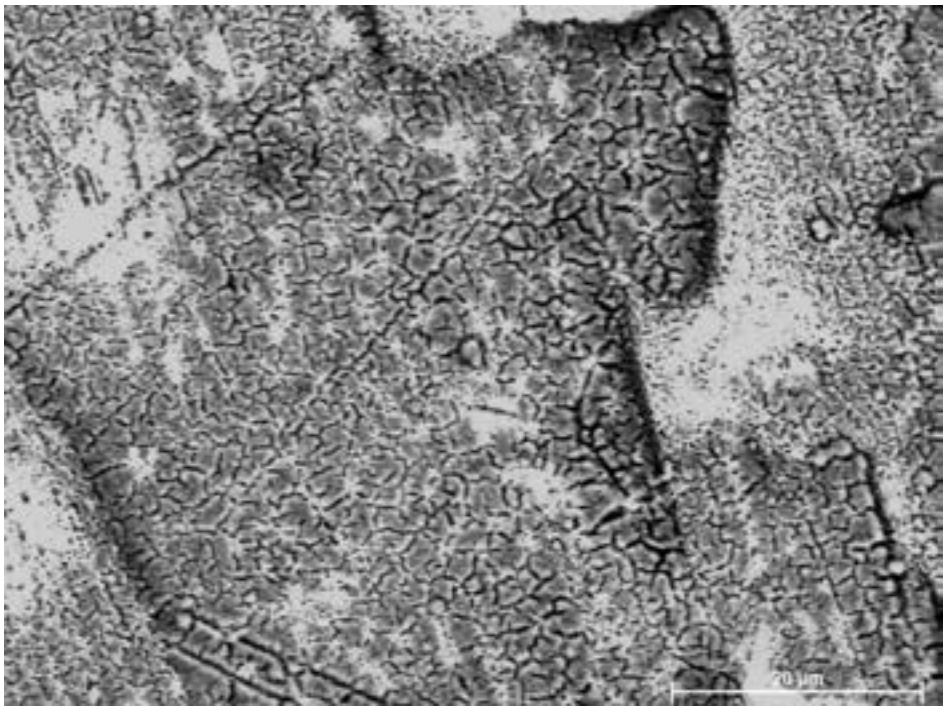


Figura 1: MEV-FEG da amostra de aço SAE 1015 após o pré-tratamento de superfície com H_2ZrF_6 e Nb_2O_5.

Observa-se regiões mais claras e escuras, sugerindo heterogeneidade na espessura da camada, o que pode estar relacionado à incorporação do Nb_2O_5 no filme. O aspecto “craquelado” é típico de camadas ricas em óxidos metálicos, indicando que o Nb_2O_5 pode ter sido incorporado à matriz de Zr, formando uma estrutura mista. Como a escala é de 20 µm, nota-se que o recobrimento se distribui de forma relativamente contínua, mas com áreas de descontinuidade, que podem atuar como pontos críticos de corrosão se não forem completamente cobertos.

A Figura 2 traz o mapa de EDS com os seguintes elementos:

Nióbio (Nb): Está distribuído de forma difusa na superfície, confirmando a incorporação do Nb_2O_5 ao filme formado. Esse resultado é consistente com a hipótese de que o Nb atua como componente da camada protetora junto ao Zr.

Oxigênio (O): Aparece em alta intensidade, o que reforça a presença de óxidos (ZrO_2 e Nb_2O_5) na camada de conversão.

Ferro (Fe): É visível principalmente em regiões onde o filme é mais fino ou apresenta microtrincas, indicando que parte do substrato ainda fica parcialmente exposta.
Carbono (C), Na, P, K e Ca: Esses elementos aparecem em menor intensidade e provavelmente estão associados a contaminações superficiais ou resíduos de solução.

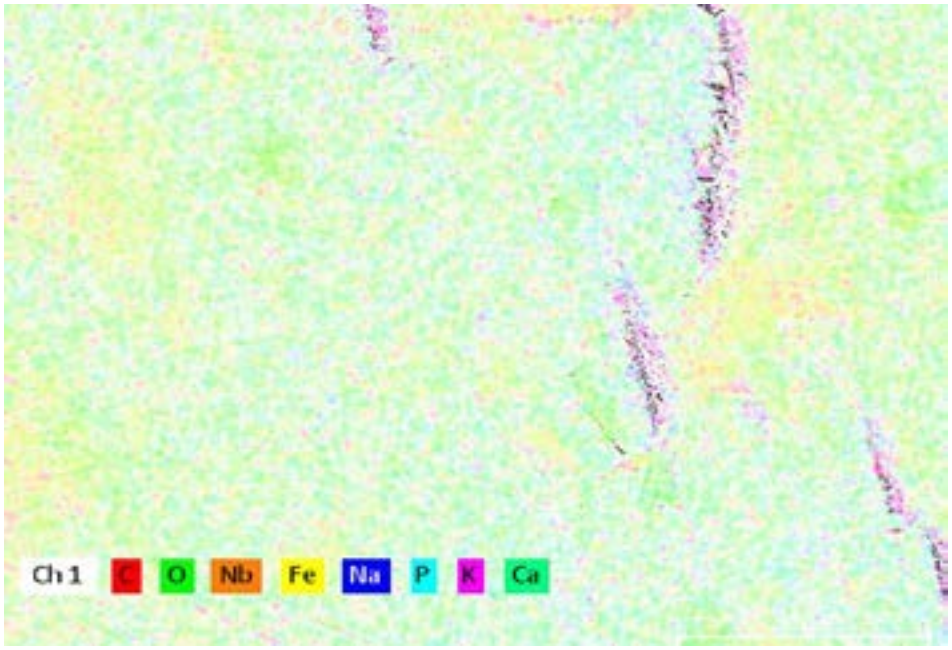


Figura 2: Mapa do EDS com Nióbio e oxigênio.

O mapeamento individual apresentado na Figura 3 mostra que tanto o oxigênio quanto o nióbio estão bem distribuídos, indicando que o Nb_2O_5 foi integrado à matriz formada pelo H_2ZrF_6, resultando em um recobrimento composto por óxidos mistos. Essa característica é positiva, pois tende a aumentar a barreira contra corrosão, já que o Nb_2O_5 é quimicamente estável e pode reforçar a resistência do filme.

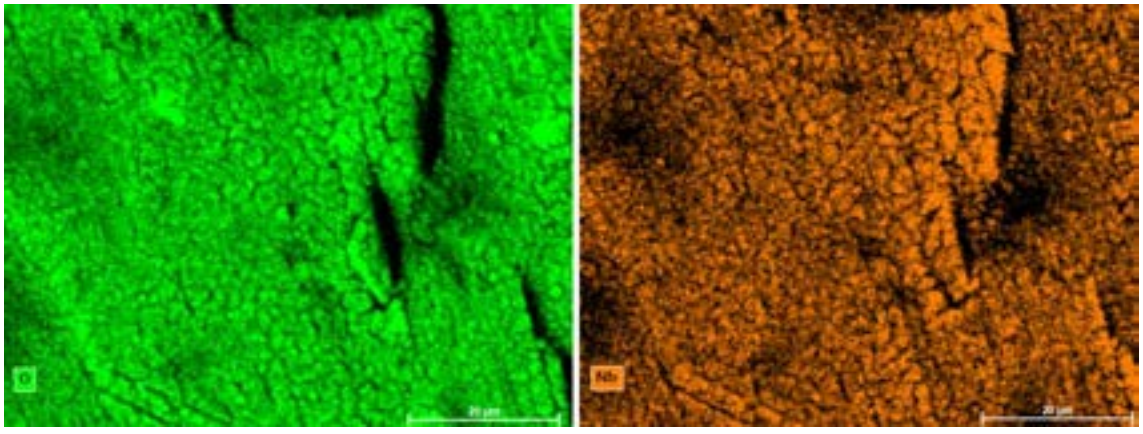


Figura 3: Mapa do EDS individual com Nióbio e oxigênio.

O espectro apresentado na Figura 4 confirma a formação de uma camada de

conversão composta majoritariamente por óxidos (O), com a incorporação efetiva do Nb junto ao Zr. A presença de Fe em menor intensidade mostra que a película não cobre de forma totalmente espessa e uniforme toda a superfície, o que está coerente com a morfologia craquelada observada no MEV. Assim, o EDS valida a hipótese de que o pré-tratamento com H_2ZrF_6 foi modificado pela adição de Nb_2O_5, resultando em um recobrimento híbrido com potencial para melhorar a resistência à corrosão.

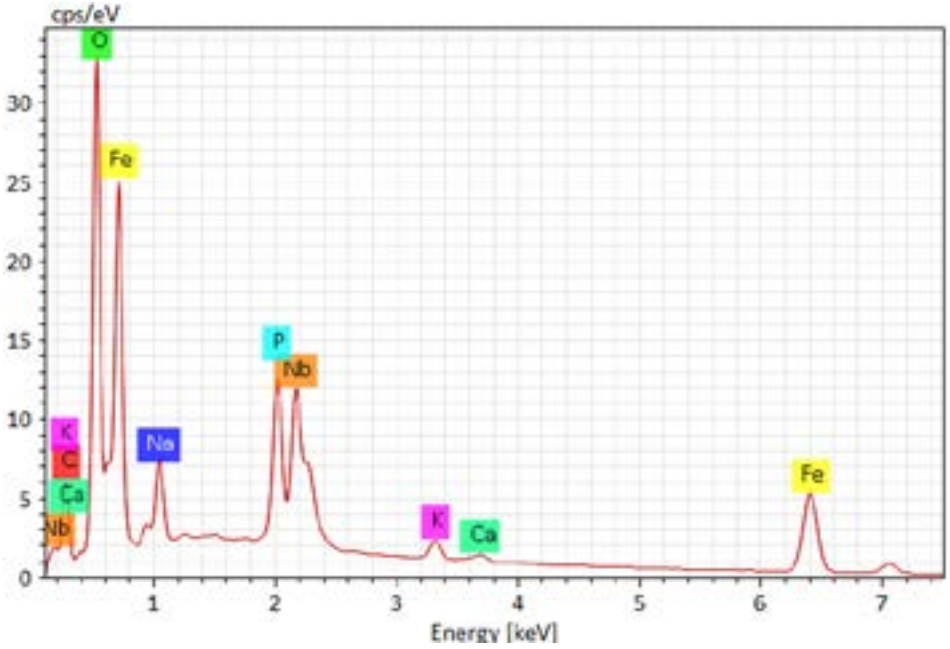


Figura 4: Espectro de EDS na amostra de SAE 1015.

Map

Element	At. No.	Mass Norm. [%]	Atom [%]	abs. error [mass%] (1 σ)
Nb	41	32,05	12,56	0,61
Fe	26	26,27	17,12	0,49
O	8	15,89	36,15	0,32
P	15	11,81	13,88	0,22
K	19	5,09	4,74	0,18
Na	11	3,50	5,55	0,09
Ca	20	2,99	2,72	0,17
C	6	2,40	7,28	0,06
		100,00	**100,00**	

Figura 5: Espectro de EDS na amostra de SAE 1015.

A análise de EDS realizada na chapa de aço SAE 1015 submetida ao pré-tratamento com H_2ZrF_6 e Nb_2O_5 apresentada na Figura 5, evidencia a incorporação significativa de nióbio na superfície (32,05% em massa), indicando a formação de uma camada enriquecida com esse elemento. Também se observou a presença de ferro (26,27%), proveniente do substrato, além de oxigênio e fósforo, que sugerem a formação de óxidos e fosfatos estáveis associados ao processo de conversão.

Elementos como potássio, sódio e cálcio aparecem em menores proporções, possivelmente oriundos do eletrólito ou de resíduos do banho, enquanto o carbono pode estar relacionado a contaminantes superficiais ou à própria matriz. Esses resultados reforçam a eficiência da adição de Nb_2O_5 no sistema baseado em H_2ZrF_6, contribuindo para a modificação química e morfológica da superfície, o que potencialmente melhora a resistência à corrosão do aço tratado.

4 CONCLUSÕES

A espectrometria confirmou que o aço SAE 1015 utilizado apresenta composição dentro dos limites da norma ASTM A29/A29M, com teor de carbono de 0,146%, manganês de 0,454% e baixo conteúdo de fósforo e enxofre, além de ferro balanceado como elemento majoritário. Esse resultado assegura a representatividade do material de base e estabelece as condições iniciais para a aplicação do pré-tratamento superficial.

O processo com solução de H_2ZrF_6 associado à adição de Nb_2O_5 promoveu a formação de uma camada de conversão caracterizada por uma morfologia com trincas finas e ramificadas, comportamento típico de filmes derivados de fluoretos de zircônio devido à retração da película durante a secagem. A análise por EDS confirmou a incorporação significativa de nióbio na superfície (32,05% em massa), além da presença de oxigênio e fósforo, sugerindo a formação de óxidos e fosfatos estáveis que reforçam a proteção contra a corrosão. Elementos residuais como K, Na e Ca foram identificados em menores teores, provavelmente relacionados ao eletrólito ou a resíduos do banho, enquanto o ferro se manteve como contribuição do substrato.

Dessa forma, os resultados demonstram que a adição de Nb_2O_5 ao sistema baseado em H_2ZrF_6 induz modificações químicas e estruturais relevantes na superfície do aço SAE 1015, possibilitando a formação de um filme de conversão com maior complexidade composicional e potencial desempenho superior em termos de resistência à corrosão. Esses achados reforçam o caráter promissor da estratégia investigada, contribuindo para o avanço de alternativas ambientalmente seguras e tecnicamente eficazes em substituição a tratamentos convencionais de proteção anticorrosiva.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Centro Universitário – UNISATC e a empresa NIONE pelo apoio a pesquisa através do uso de sua estrutura de laboratórios, e a Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina – FAPESC pelo apoio financeiro na compra de equipamentos e insumos para a pesquisa.

5 REFERÊNCIAS

[1] RAMANATHAN, E., BALASUBRAMANIAN, S. Synthesis and characterization of hexafluorozirconic acid powder and its application in nanoceramic coating. Surface and Coatings Technology Volume 304, 25 October 2016, Pages 228-236.

[2] VATABI, R., ZAMANI-MEYMIAN, M., GHAFFARINEJAD, A., KHALILZAD, S. Corrosion protection of Cr–Cu alloy coating on stainless steel. Surface & Coatings Technology. Volume 447, 2023.

[3] SREEKANTH, R., PATTABHI, V. E RAJAN, S. S. Molecular basis of chromium insulin interactions. Biochemical and Biophysical Research Communications. 2008, Vol. 369, pp. 725-729. [5] Tocchetto,

[4] MARTA R.L. Implantação de Gestão Ambiental em grandes empresas com atividade galvânica no Rio Grande do Sul. Tese de Doutourado em Engenharia de Materiais, PPGE3M UFRGS. Porto Alegre: s.n., 2004

[5] SAID, V.H., HAAKMANN, F., BRINKBAUMER, J., ULBRICHT, M. Comparison of the nucleation and growth of a phosphate conversion coating on Zn–Al and Zn–Al–Mg coatings under the influence of a corrosion inhibitor film. Surface and Coatings Technology Volume 451, 15 December 2022, 129044.

[6] WAZER, J.R.V Phosphorous and its Compounds, vol. II, Interscience Publishers Inc., New York, 1967.

[7] ZHAO, J., XIA, L., SEHGAL, A., LU, D., MCCREERY, R.L., FRANKEL, G.S. Effects of chromate and chromate conversion coatings on corrosion of aluminum alloy 2024-T3. Surface and Coating Tecnology. Volume 140, 2001, Pages 51-57.

[8] BOSSARDI, K., FERREIRA, J.Z. Nanotecnologia aplicada a tratamentos superficiais para o aço carbono 1020 como alternativa ao fosfato de zinco. ABRACO, INTERCORR 2008.

[9] ZHELUDKEVICH, M.L., SERRA, R., MONTEMOR, M., FERREIRA, M.G.S. Oxide nanoparticle reservoirs for storage and prolonged release of the corrosion inhibitors. Electrochemistry Communications. Volume 7, 2005, Pages 836-840.

[10] COLOMA, P.S., IZAGIRRE, U., BELAUSTEGI, Y., JORCIN, J.B., CANO, F.J. LAPEÑA, N. Chromium-free conversion coating based on inorganic salts (Zr/Ti/Mn/Mo) for aluminum alloys used in aircraft applications. Applied Surface Science. Volume 345, 2015, Pages 24-35.

[11] LUNDER, O., SIMENSEN, C., YU, Y., NISANCIOGLU, K. Formation and characterization of Ti-Zr based conversion layers on AA6060 aluminium. Surface and Coating Technology. Volume 184, 2004, Pages 278-290.

[12] MORAES, J.A., ADAMS, G., MENEGUZZI, A., FERREIRA, J.Z. Estudo do Revestimento Nanocerâmico/Titânio em Aço Carbono na Proteção Contra a Corrosão. ABRACO, INTERCORR, 2010.

[13] BADAMASI, H., BASHIR, I,A., YARO, M.N. Impacts of Phosphates on Water Quality and Aquatic Life. Chemistry Research Journal, Volume 4, 2019, Pages 124-133.

[14] OLIVEIRA, M., MACHADO, A.V. The role of phosphorus on eutrophication: a historical review and future perspectives. Environmental Technology Reviews. Volume 2, 2013.

[15] QUEVEDO, C.M.G., PAGANINI, W.S. Management of phosphorus in water: case study of the Tietê River, Brazil. Rev. Ambient. Água, Volume 12, 2017.

[16] ORTIZ-REYES, E., ANEX, R.P. A life cycle impact assessment method for freshwater eutrophication due to the transport of phosphorus from agricultural production. Journal of Cleaner Production, Volume 177, 2018, Pages 474-482.

[17] MOHAMMADLOO, H.E., et al. Nano-ceramic hexafluorzirconic acid based conversion thin film: surface characterization and electrochemical study. Surface and Coatings Technology. Volume 206, Issues 19-20. 2012, Pages 4132-4139.

[18] ADHIKARI, S., UNOCIC, K.A., ZHAI, Y., FRANKEL, G.S., ZIMMERMANB, J., FRISTADB, W. Hexafluorozirconic acid based surface pretreatments: Characterization and performance assessment. Electrochimica Acta, Volume 56, 2011, Pages 1912–1924.

[19] PINHEIRO, J.S., REGIO, G., CARDOSO, H.R.P., OLIVEIRA, C.T., FERREIRA, J. Z. Influence of Concentration and pH pf Hexafluorzirconic Acid on Corrosion Resistance of Anodized AA7075-T6. Materials Research. Volume 22, 2019.

[20] SALDANHA, J.B., CARDOSO, H.R.P., FERREIRA, J.Z. Otimização das variáveis do processo de conversão de revestimento nanocerâmico à base de Titânio sobre aço galvanizado. ABRACO, INTERCORR 2018.

[21] SMIT, M.A., HUNTER, J.A., SHARMAN, J. SCAMANS, G.M. Effect of organic additives on the performance of titanium-based conversion coatings. Corrosion Science, Volume 45, 2003, Pages 1903-1920.

[22] BANJO, N., SASAKI, TT, HONO, K. Controle de microestrutura de revestimentos de conversão à base de Ti para otimização de propriedades de revestimentos orgânicos em ligas A6063 e A3003. Sufarce and Coatings Technology, Volume 468, 2023.

[23] MILOSEV, I., FRANKEL, G.S. Review—Conversion Coatings Based on Zirconium and/or Titanium. Journal of The Electrochemical Society. Volume 165, 2018, Pages 127-144.

[24] ROSHAN, S., JAFARI, R., MOMEN, G. Polyurethane Nanocomposite Coatings Coupled with Titanium-Based Conversion Layers for Enhanced Anticorrosion, Icephobic Properties, and Surface Protection. Molecules, Volume 29, 2024.

[25] FAROOQ, S., RAINA, A., MOHAN, S., SINGH, R.A., JAYALAKSHMI, S., HAQ, M.I. Nanostructured Coatings: Review on Processing Techniques, Corrosion Behaviour and Tribological Performance. Nanomaterials, Volume 12, 2022.

[26] ABDEEN, D.H., HACHACH, M.E.I., KOC, M., ATIEH, M.A. A Review on the Corrosion Behaviour of Nanocoatings on Metallic Substrates. Materials, Volume 12, 2018.

[27] RODRIGUES, P.R.P., TERADA, M., JUNIOR, O.R.A., LOPES, A.C., COSTA, I., BANCZEK, E.P. Niobium pentoxide coating replacing zinc phosphate coating. REVISTAMATÉRIA. 2014, Pages 105-116.

[28] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard specification for general requirements for steel bars, carbon and alloy, hot-wrought. ASTM A 29/A29M - 20. West Conshohocken, PA, 2020.

[29] TSAI, YU-TE., HOU, KUNG. HSU., BAI, CHING. YUAN.; LEE, JEOU. LEE., GER, MING. DER. The influence on immersion time of titanium conversion coatings on electrogalvanized steel. Thin Solid Films. Volume 518, 2010, Pages 7541-7544.
[30] VERDIER, STÉPHANE., LAAKB, NICOLE VAN DER., DALARDA, FRANCISCO., METSONC, JAMES.; DELALANDE, STÉPHANE. An electrochemical and SEM study of the mechanism of formation,morphology and composition of titanium or zirconium fluoride-based coatings. Surface & Coatings Technology. Volume 200, 2006, Pages 2955-2964.

44º SENAFOR

28th International Forging Conference
13th International Sheet Metal Forming Conference / 10th BrDDRG Congress
13th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies – Brazil/RS
2nd International Conference on Innovation in Materials and Manufacturing
Hotel Plaza São Rafael – P. Alegre RS, October 1-3, 2025

EFEITO DO FORJAMENTO A MORNO SOBRE A LIGA AWS A5.28 E110C-G PRODUZIDA POR MANUFATURA ADITIVA

Joélson Vieira da Silva [1]
Lirio Schaeffer [2]
Anderson Daleffe [3]
Henrique Cechinel Casagrande [4]

RESUMO

A manufatura aditiva por arco elétrico (WAAM) tem se mostrado como uma alternativa eficiente para a produção de peças metálicas para um gama variado de peças, especialmente utilizando ligas de alta resistência. Este estudo avalia o efeito do forjamento a morno sobre as propriedades mecânicas e a microestrutura da liga AWS A5.28 E110C-G, fabricada por WAAM. Corpos de prova foram produzidos por deposição multicamada e em três diferentes direções (0º, 45º e 90º) sendo posteriormente submetidos a forjamento a morno. As amostras foram caracterizadas por ensaios mecânicos (tração e dureza) e por análises microestruturais utilizando microscopia óptica e eletrônica de varredura. O forjamento a 800 °C alterou significativamente a microestrutura do aço de baixa liga, evidenciado por deformação dos grãos e inclusões, alinhamento microestrutural. Observou-se também uma melhora na anisotropia do material. A combinação entre WAAM e forjamento a morno mostrou-se uma rota promissora para a melhoria do desempenho estrutural de componentes fabricados com a liga E110C-G M, contribuindo para a confiabilidade e aplicação da manufatura aditiva em setores exigentes como a indústria automobilística e aeronáutica.

1. Introdução

A tecnologia de Manufatura Aditiva por Arame e Arco (WAAM, do inglês *Wire Arc Additive Manufacturing*) vem se consolidando como uma abordagem eficiente para a obtenção de peças metálicas, fundamentada no princípio da deposição sucessiva de camadas de material. Seu uso tem atraído crescente interesse, especialmente na

produção de componentes de grande porte, em virtude da elevada produtividade e dos custos relativamente reduzidos do processo [1,2,3,4]. Além disso, destaca-se por vantagens significativas em comparação a rotas convencionais de fabricação, como o aproveitamento mais racional da matéria-prima, a redução dos tempos de fabricação e a possibilidade de conceber estruturas de geometrias complexas [3,5,6].

O processo WAAM já demonstrou aplicabilidade em uma ampla gama de ligas metálicas, incluindo alumínio, aços ao carbono e aços inoxidáveis [4,7]. Apesar desse avanço, a técnica ainda enfrenta obstáculos relevantes, entre eles a limitação na precisão dimensional e geométrica [8,9], além da ocorrência de defeitos como porosidade, desenvolvimento de tensões residuais e comportamento anisotrópico tanto na microestrutura quanto nas propriedades mecânicas [4,8]. Para que seu uso seja plenamente consolidado em escala industrial, torna-se essencial aprofundar os estudos sobre aspectos metalúrgicos do processo, bem como avaliar de forma abrangente seu desempenho mecânico e sua resistência à corrosão [8].

Por outro lado, o processo de forjamento é amplamente reconhecido por garantir excelente precisão dimensional e baixo custo por unidade, sobretudo quando aplicado à produção em grande escala. Nesse contexto, surge a manufatura híbrida, que associa a manufatura aditiva a técnicas de conformação mecânica, como uma estratégia promissora para superar limitações do WAAM [10]. Essa integração de processos possibilita maior eficiência na cadeia de fabricação, além de contribuir para a redução de custos e tempos de produção. Outro ponto relevante é sua capacidade de minimizar falhas inerentes à manufatura aditiva, como imperfeições geométricas e a presença de descontinuidades metalúrgicas [11].

A manufatura híbrida pode ser entendida como a associação entre técnicas aditivas e subtrativas, concebida para atenuar as restrições impostas quando essas abordagens são empregadas isoladamente. Especificamente na integração do WAAM com o forjamento, o objetivo central é refinar a geometria e a qualidade das camadas depositadas por meio da aplicação de deformações plásticas controladas. Esse procedimento contribui para o aumento da rigidez estrutural e para a melhoria da resistência ao desgaste dos componentes produzidos [12].

Pesquisas envolvendo a manufatura híbrida que combina WAAM e forjamento têm demonstrado que os componentes resultantes podem apresentar adequada continuidade metalúrgica na região de transição [13]. Apesar disso, ainda são escassas as informações a respeito do impacto do WAAM sobre a microestrutura da liga AWS A5.28 E 110C-G M, sobretudo quando esta é submetida a etapas posteriores de forjamento. Aspectos como o trajeto de deposição, a disposição das camadas e a presença de tensões residuais exercem influência direta sobre a morfologia dos grãos, a formação de estruturas dendríticas e os mecanismos de precipitação de fases.

A liga AWS A5.28 E 110C-G M, reconhecida por sua elevada resistência mecânica e frequentemente empregada em aplicações estruturais, já vem sendo explorada em rotas de manufatura aditiva. Entretanto, ainda há uma carência de investigações que avaliem seu desempenho quando submetida a etapas de forjamento a morno após a deposição via WAAM, o que limita a compreensão de seu comportamento microestrutural e mecânico nesse contexto.

Nesse contexto, o presente estudo propõe a produção de um componente híbrido obtido pela integração do processo WAAM com o forjamento. Para avaliar o desempenho do material resultante, foram realizados ensaios de tração e medições de dureza na região depositada. O objetivo central é investigar de que forma a estratégia híbrida afeta a resistência mecânica, em especial a tração, além de discutir a

influência dessa combinação de processos nas propriedades finais do componente fabricado.

2. Materiais e métodos

Todos os recursos e equipamentos descritos a seguir, necessários à execução dos testes foram disponibilizados pelo Centro Universitário UniSATC.

2.1. Impressão das pré-formas

Para a etapa de fabricação dos corpos de prova, foram utilizadas amostras produzidas com o equipamento de soldagem Lincoln Electric, modelo YRC1000 AR1440 Power Wave E600, da Yaskawa, instalado no Laboratório de Manufatura Aditiva da Unisatc. A deposição foi realizada em peça única, com geometria plana, a qual posteriormente foi destacada e usinada até atingir as dimensões especificadas, resultando em um total de nove amostras. O sistema robótico empregado na impressão encontra-se ilustrado na Fig. 1.

Figura 1: Braço robótico de soldagem automática.

A etapa de programação da manufatura aditiva foi conduzida por meio do software disponibilizado pelo fabricante do braço robótico, operando em ambiente de controle numérico computadorizado (CNC). O planejamento da trajetória de deposição considerou as dimensões da parede a ser impressa, adotando um deslocamento longitudinal aliado a um padrão circular de movimento, estratégia empregada para ampliar a largura do cordão de solda. Com esse procedimento, foi possível fabricar uma parede com dimensões de 300 × 180 × 15 mm (Fig. 2).

Figura 2: Parede impressa para remoção dos corpos de prova.

A coleta dos parâmetros de deposição foi realizada por meio da ferramenta SAP 3SR. O processo ocorreu com velocidade de 350 mm/min, adotando-se um incremento de 2,5 mm para cada camada depositada. Os valores utilizados no experimento estão apresentados na Tab. 1.

Tabela 1: Parametetros de deposição.

Parametro	Valor
Corrente (A)	110
Tensão (V)	15
Vazão do gás (L/mm)	12,5
Velocidade do arame (m/min)	5,5
Argônio (%)	75
Dióxido de carbono (%)	25
Deslocamento da tocha (mm/min)	300

A análise química do material depositado pode ser conferida na Tab. 2:

Tabela 2: Composição química do aço depositado.

Elemento	C	Mn	Si	P	S	Ni	Mo
%	0,07	1,57	0,42	0,01	0,01	1,49	0,34

2.2. Forjamento

O processo de forjamento foi conduzido em etapa única para cada amostra, utilizando-se uma prensa hidráulica FN150, com capacidade de 150 toneladas, fabricada pela FKL Máquinas e disponível no Laboratório de Conformação Mecânica da Unisatc. As amostras foram previamente aquecidas a 1.150 °C, condição que permitiu a obtenção da forma final dos componentes analisados. A Fig. 3 apresenta a prensa empregada nos ensaios.

Figura 3: Prensa de forjamento.

3. Resultados e discussões

O ensaio de tração realizado em três orientações distintas em relação à direção de impressão (0°, 45° e 90°) revelou que o material antes do forjamento apresentava maior anisotropia, embora exibisse resistência à tração superior em comparação ao material pós-forjamento. Após o forjamento, os corpos de prova demonstraram menor deformação, sugerindo um aumento da dureza na condição pós-deformação.

Na etapa pós-forjamento, observou-se comportamento similar nas direções de 45° e 90°, com resistência à tração em torno de 645 MPa. Já na direção longitudinal (0°), o material atingiu sua resistência máxima, aproximadamente 720 MPa, mantendo ductilidade próxima à das outras orientações, pouco acima de 6%. As curvas de tensão podem ser vistas na Fig. 4.

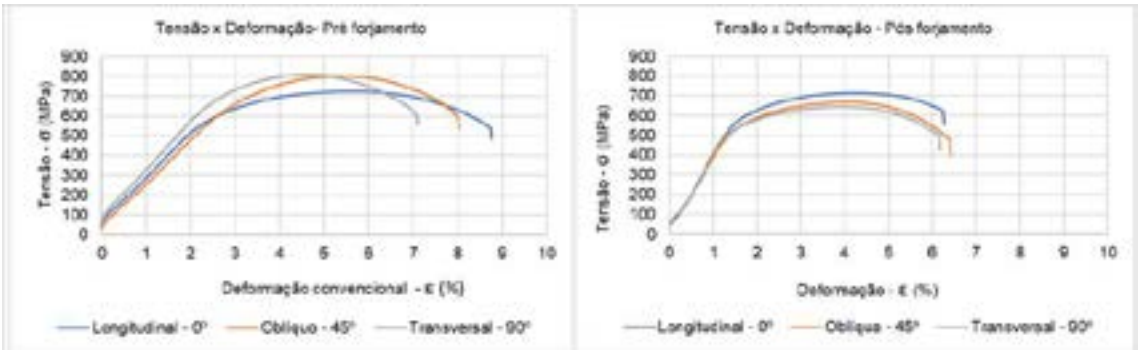


Figura 4: Gráficos de tensão x deformação antes e depois do forjamento.

Esses resultados indicam que a orientação da carga em relação ao sentido de deposição influencia significativamente as propriedades mecânicas, com o desempenho máximo observado na direção longitudinal, enquanto a ductilidade permaneceu praticamente constante entre as diferentes orientações.

Os valores dos ensaios de tração podem ser vistos na Tab. 3 e 4.

Tabela 3: Caracterização dos ensaios de resistência a tração antes do forjamento.

Sentido de Impressão [º]	Tensão máxima $\sigma_{máx}$ [Mpa]	Tensão de escoamento σ_e [Mpa]	Deformação ε [%]
0	724,47	604,00	8,83
45	799,95	714,36	8,20
90	810,25	695,82	7,17

Tabela 4: Caracterização dos ensaios de resistência a tração após o forjamento.

Sentido de Impressão [º]	Tensão máxima $\sigma_{máx}$ [Mpa]	Tensão de escoamento σ_e [Mpa]	Deformação ε [%]
0	716,67	597,20	6,23
45	646,24	530,38	6,30
90	644,54	545,88	6,17

Observando-se o tipo de fratura na Fig. 5, constatou-se que o corpo de prova apresentou uma fratura do tipo dúctil, com estricção visível.

Figura 5: Fratura dúctil dos CPs, caracterizada pelo ângulo de ruptura (45º aprox.) e pela estricção visível.

As medições de microdureza indicaram que o aço manteve suas propriedades, sem evidência de alterações significativas na dureza ou a formação de uma zona de transição decorrente do forjamento. Em contraste, o alumínio apresentou redução expressiva nos valores de dureza após o forjamento, tanto nas regiões próximas quanto nas mais distantes da junta. Esse comportamento sugere que a baixa taxa de resfriamento favoreceu a precipitação durante o processo, comprometendo a efetividade do endurecimento pós-tratamento térmico. Resultado semelhante foi relatado por Huang [14]. Os valores das microdurezas podem ser conferidas na Fig. 5.

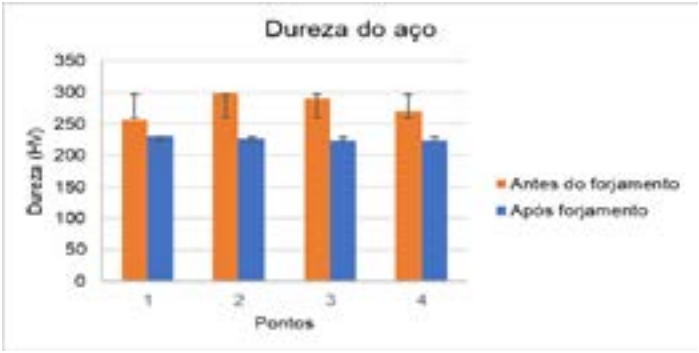


Figura 5: Dureza do aço antes e após forjamento.

A análise metalográfica do aço na condição anterior ao forjamento (Fig. 6a) revelou grãos equiaxiais relativamente homogêneos, característicos de um estado de recozimento. Observou-se ainda a presença de partículas escuras finamente dispersas, possivelmente carbonetos ou óxidos, distribuídas de forma uniforme na matriz metálica. Essa microestrutura apresentou aspecto estável e pouco deformado, evidenciando que o material não havia sido submetido a solicitações mecânicas significativas. Já na condição pós-forjamento (Fig. 6b), verificou-se a formação de uma estrutura alongada e orientada, típica do processo de conformação plástica.

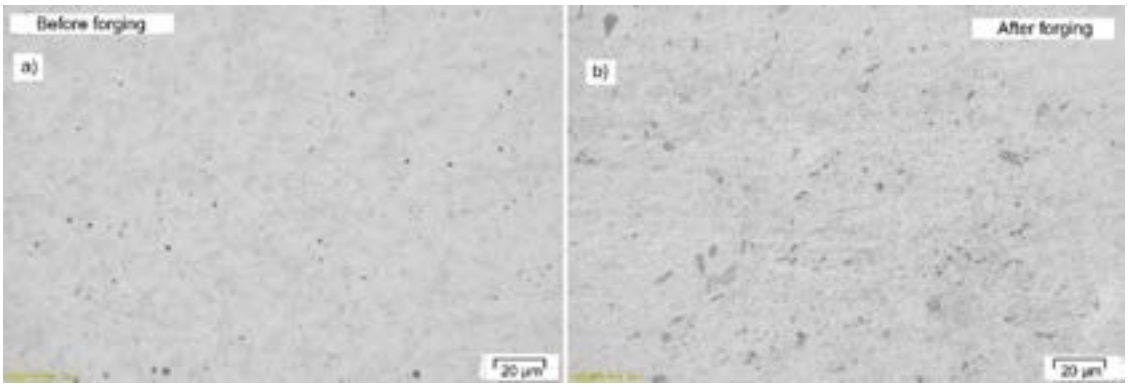


Figura 6: Aço depositado, a) antes do forjamento e b) após o forjamento. Sem ataque.

4. Conclusões

O presente estudo demonstrou a viabilidade da aplicação do forjamento em conjunto com a Manufatura Aditiva por Arco com Arame (WAAM) para a produção de componentes em aços de baixa liga, destacando a influência da direção de impressão sobre as propriedades mecânicas.

A utilização do arame AWS A5.36 E110C-G M evidenciou que tanto a orientação da deposição quanto a etapa de forjamento afetam diretamente a resistência e a ductilidade das peças, possivelmente em função do aumento de dureza promovido pelo processo de deformação.

Nesse sentido, a WAAM se apresenta como uma alternativa promissora para a fabricação de peças metálicas complexas, sobretudo em aplicações que exigem altas taxas de deposição aliadas a boa integridade estrutural. Para ampliar seu uso em escala industrial, torna-se fundamental o controle rigoroso dos parâmetros de deposição, com o objetivo de reduzir a anisotropia microestrutural e otimizar o desempenho mecânico. Além disso, avanços na mitigação de defeitos, como inclusões

e porosidades, são cruciais para elevar a confiabilidade do processo.

Este trabalho constitui uma investigação preliminar, recomendando-se o aprofundamento em pesquisas futuras, incluindo variações de temperatura e a exploração do forjamento a quente.

References

[1] WILLIAMS, S. W. et al. Wire + Arc Additive Manufacturing. **Materials Science and Technology**, v. 32, n. 7, p. 641–647, 9 fev. 2016.
[2] DEBROY, T. et al. Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties. **Progress in Materials Science**, v. 92, p. 112–224, mar. 2018.
[3] SHAH, A. et al. A Review of the Recent Developments and Challenges in Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) Process. **Journal of Manufacturing and Materials Processing**, v. 7, n. 3, p. 97, 1 jun. 2023.
[4] VIMAL, K. E. K.; NAVEEN SRINIVAS, M.; RAJAK, S. Wire arc additive manufacturing of aluminium alloys: A review. **Materials Today: Proceedings**, out. 2020.
[5] SATURNO, et. al. Avaliação do Processo de Manufatura Aditiva Baseado na Técnica WAAM a Partir do HL 85 MC-B. Revista Vincci - Periódico Científico do UniSATC, [S. l.], v. 8, n. 1, p. 258–278, 2023.
[6] SILVA, J. V. D., SCHAEFFER, L., DALEFFE, A., MILANEZ, A., CASAGRANDE, H. C., & MARCH, G. D. (2025). Analysis of the Bimetallic Joint of a Hot-Forged Crosshead Composed of ASTM B221 6060 Aluminum and AWS A5. 36 E110C-G M Low Alloy Steel Obtained by Localized Fusion Additive Manufacturing. Materials Research, 28, e20250347.
[7] ALDALUR, E. et al. High deposition wire arc additive manufacturing of mild steel: Strategies and heat input effect on microstructure and mechanical properties. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 58, p. 615–626, out. 2020.
[8] JIN, W. et al. Wire Arc Additive Manufacturing of Stainless Steels: A Review. **Applied Sciences**, v. 10, n. 5, p. 1563, 1 jan. 2020.
[9] GAO, L. et al. An operando synchrotron study on the effect of wire melting state on solidification microstructures of Inconel 718 in wire-laser directed energy deposition. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 194, p. 104089, 9 nov. 2023.
[10] LI, H. et al. Effect of Cold Pressing Deformation on Microstructure and Residual Stress of 7050 Aluminum Alloy Die Forgings. **Materials**, v. 16, n. 14, p. 5129–5129, 20 jul. 2023.
[11] HAFENECKER, J. et al. Hybrid process chains combining metal additive manufacturing and forming – A review. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v. 46, p. 98–115, 15 ago. 2023.
[12] PRAGANA, J. P. M. et al. Hybrid metal additive manufacturing: A state–of–the-art review. **Advances in Industrial and Manufacturing Engineering**, v. 2, n. 100032, p. 100032, 2021.
[13] BAMBACH, M. et al. Hybrid manufacturing of components from Ti-6Al-4V by metal forming and wire-arc additive manufacturing. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 282, p. 116689, ago. 2020.
[14] ABNT NBR-6892. **Materiais metálicos** – Ensaio de tração à temperatura ambiente. ABNT. Rio de Janeiro. 2019

44º SENAFOR

28ª Conferência Internacional de Forjamento - Brasil
14ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas / 11º Congresso do BrDDRG
14ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis
3ª Conferência Internacional de Inovação em Materiais e Manufatura
Porto Alegre, RS, dias 1, 2 e 3 de outubro de 2025
www.senafor.com

MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO DUPLO ARAME DE MATERIAIS RESISTENTES A DESGASTE: CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL

Langbehn. Jamile Thön [1]
Daleffe. Anderson [2]
Schaeffer. Lirio [3]
Casagrande, Henrique Cechinel[4]
Crozetta, Natan Damian [5]
Castro, Richard de Medeiros [6]

RESUMO

A manufatura aditiva por deposição a arco (MADA) com processo GMAW duplo arame apresenta-se como alternativa de menor custo em relação a técnicas a laser para revestimento de componentes sujeitos ao desgaste. Neste trabalho, foram depositadas paredes a partir da mistura dos arames UTP A DUR 600 e NCSW Rapid 952T, buscando aliar alta dureza com maior resistência ao impacto. A deposição ocorreu em sistema CNC com duas fontes GMAW, resultando em parede com boa fusão, embora com irregularidades geométricas. A microestrutura obtida foi martensítica, com carbonetos dispersos e ausência de trincas, apresentando dureza média de 643 HV. Os resultados indicam que a técnica possui potencial para gerar revestimentos resistentes à abrasão e mais tenazes, demandando estudos futuros de parâmetros de soldagem e propriedades tribológicas.

Palavras Chave — MADA, GMAW, Microestrutura, Revestimento.

1. INTRODUÇÃO

A manufatura aditiva por deposição a arco (MADA) tem sido alvo de intensas pesquisas em diferentes aplicações, incluindo o revestimento de componentes sujeitos

[1] Doutoranda PPGE3M, UFRGS, jamile.thon@satc.edu.br
[2] Prof. Dr., Centro Universitário UNISATC, anderson.daleffe@satc.edu.br
[3] Prof. Dr., UFRGS, schaefer@ufrgs.br
[4] Doutorando PGMAT, UFSC, henrique_cechinel@hotmail.com
[5] Mestrando em Engenharia Metalúrgica UNISATC, natan.crozetta@satc.edu.br
[6] Prof. Dr., Centro Universitário UNISATC, richard.castro@satc.edu.br

ao desgaste [1],[2]. Entre as técnicas disponíveis, a manufatura aditiva por arco elétrico utilizando o processo GMAW (*gas metal arc welding)* com duplo arame desponta como alternativa mais acessível ao processo a laser, amplamente empregado [3]. Além do menor custo dos equipamentos, essa técnica permite combinar dois arames comerciais de ampla disponibilidade no mercado, resultando em materiais com propriedades específicas [4]. A Figura 1 mostra algumas técnicas de MADA duplo arame com processo GTAW (*gas tungsten arc welding*) e GMAW.

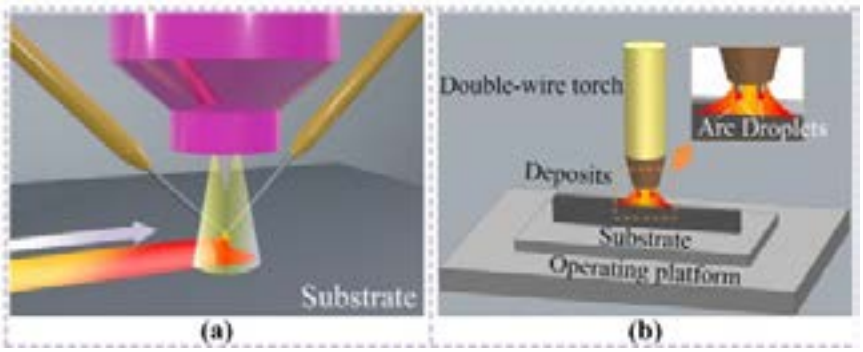


Figura 1: MADA duplo arame. (a) GTAW. (b) GMAW com tocha adaptada. Adaptado de [3].

Nos últimos anos diversos trabalhos vêm explorando a criação de ligas *in*-situ misturando arames por MADA com diferentes finalidades [5]. Alguns trabalhos buscam a mistura das ligas para obter propriedades específicas [6]-[8], enquanto outros buscam a deposição de materiais em gradiente, obtendo um material funcionalizado com variação de propriedades ao longo da parede [9].

O objetivo deste trabalho é depositar uma parede por MADA duplo arame com os arames UTP A DUR 600 e NCSW Rapid 952 T obtendo uma nova liga. Ambos são utilizados para revestimento contra desgaste. O primeiro arame possui uma característica frágil, com grande presença de trincas de alívio térmico e baixa resistência a impacto. O segundo possui uma característica de maior tenacidade e resistência a impacto sem a formação de trincas. A motivação do trabalho é obter um revestimento que mantenha a resistência a abrasão, porém com menor formação de trincas e maior resistência ao impacto.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização do trabalho foram utilizados os arames UTP A DUR 600 e o NSCW Rapid 952T, cujas composições químicas são mostradas na Tabela 1. Ambos possuem 1,2mm de diâmetro.

Tabela 1: Composição química dos arames utilizados no trabalho.

Material		**%C**	**%Mn**	**%Si**	**%Cr**	**%Mo**	**%W**	**%V**
UTP AF DUR 600	Méd	0,5	0,5	3,0	9,5	--	--	--
NCSW Rapid 952T	Min	0,50	1,0	-	5,0	2,5	1,0	0,5
	Máx	0,65	2,0	0,7	8,0	4,0	1,5	1,0

Para o processo de MADA duplo arame foi utilizado um sistema cartesiano CNC com duas máquinas de solda GMAW acopladas, sendo uma máquina IMC DIGIplus A7 e uma máquina ESAB Smashwelding 250E. As tochas foram posicionadas a fim de ficarem com um ângulo de 50° em relação a base de soldagem, conforme Figura 2.

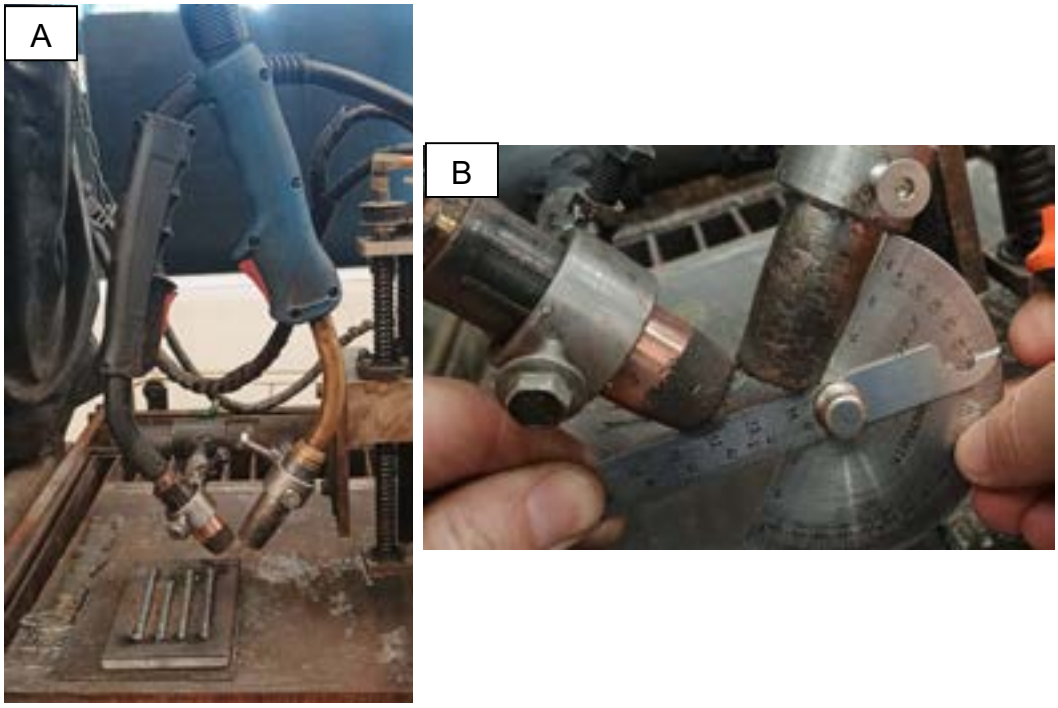


Figura 2: Sistema cartesiano com tochas de soldagem acopladas. (a) dispositivo e disposição das tochas no braço mecânico. (b) ângulo das tochas em relação a base de deposição.

Na Tabela 2 estão descritos os parâmetros de soldagem utilizados na MADA. Esses parâmetros foram definidos por meio de testes iniciais, até que fosse alcançado um cordão de qualidade. O arco elétrico foi aberto apenas por uma das tochas (alimentando DUR600), enquanto a outra tocha apenas alimentou o segundo arame. O gás de proteção foi fornecido por um cilindro único com uma mangueira dupla, desta forma a vazão de gás total foi distribuída para as duas tochas. A deposição foi realizada sobre uma base de aço SAE 1020.

Tabela 2: Parâmetros de MADA

Parâmetros	Valor
Tensão	20V
Velocidade de alimentação do arame DUR 600	5,7m/min
Velocidade de alimentação do arame 952	4m/min
Velocidade de soldagem	0,25m/min
Corrente	171A
Vazão de gás	22L/min

Para a caracterização microstrutural foi realizado ensaio de metalografia. A preparação da amostra seguiu a norma ASTM E-3 com as etapas de lixamento utilizando lixas de grão #80 até #1200, polimento utilizando politriz com pano de polimento e solução de alumina 1µm e ataque em nital 2% para revelação da microestrutura. Para aquisição das imagens foi utilizado um microscópio Olympus BMX com ampliações de 50x, 100x, 200x

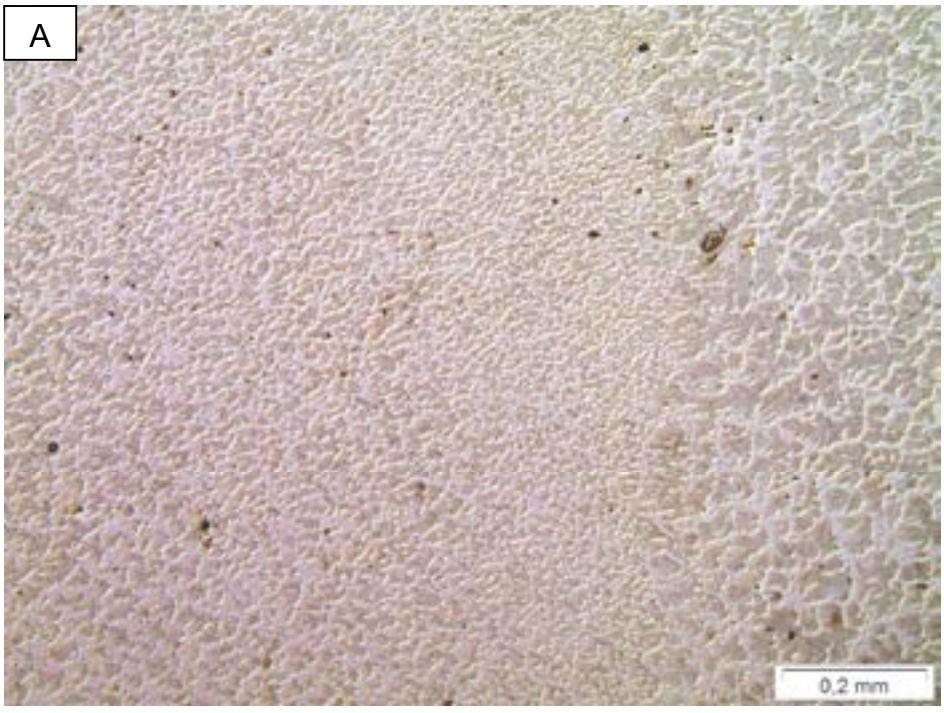
As amostras preparadas para metalografia também foram utilizadas para a análise de microdureza Vickers em um microdurômetro Shimadzu HMV, utilizando método HV1 com uma força aplicada de 9,807N por 10s.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A parede foi criada por meio da deposição de 8 camadas e uma altura final de aproximadamente 19mm e comprimento de 110mm. Visualmente a deposição ocorreu bem, sem separação ou desplacamento dos materiais, indicando que a mistura dos materiais na poça de fusão foi bem-sucedida. Porém, foi observado alguns escorrimentos do material em algumas camadas, fazendo com que a parede tivesse medidas não uniformes. Para futuros testes será necessário rever as condições de deposição para obter uma melhor estrutura da parede. A Figura 3 mostra a parede final obtida por MADA duplo arame.

Figura 3: Parede obtida por MADA duplo arame.

O ensaio de metalografia revelou que a mistura dos materiais foi bem sucedida, visto que a mimcroestrutura final ficou homogênea ao longo de todo o cordão. A Figura 4 mostra a microestrutura obtida, destando a divisa entre passes de deposição.



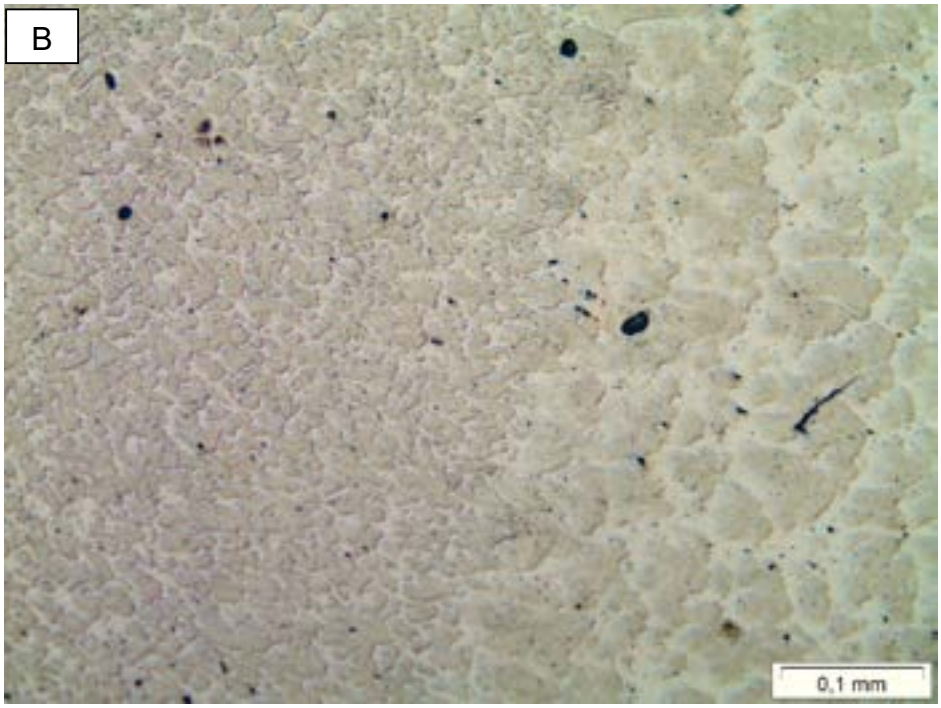


Figura 4:Metalografia da mistura dos dois arames usados no estudo obtidos por MADA. Ampliação de (a) 100x e (b) 200x.

A microestrutura obtida com a mistura dos materiais consiste em uma matriz martensítica com formação de carbonetos dispersos de forma homogênea nos contornos de grão. A microestrutura condiz com a composição dos arames que possuem médio teor de carbono e elementos de liga formadores de carbonetos como cromo, tungstênio e vanádio. A variação no tamanho de grão entre passes de deposição ocorre devido ao reaquecimento dos cordões depositados a cada novo passe, o que já era esperado para esta técnica. Não foram observadas trincas no material de deposição, resultado positivo para a mistura dos materiais estudados.

O perfil de microdureza Vickers da parede obtida por MADA apresentada na Figura 5 possui uma dureza média de 643HV.

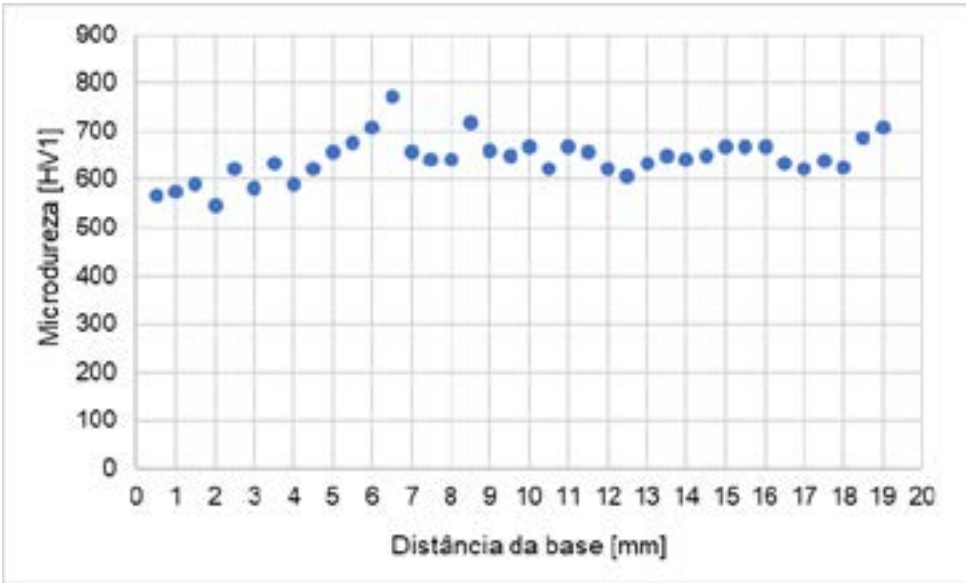


Figura 5: Microdureza Vickers HV1.

Os primeiros passes obtiveram as menores durezas, o que é esperado pela diluição com o metal de base. Nos últimos passes a dureza se manteve mais homogênea variando entre 600 e 700HV. A alta dureza corrobora com a microestrutura observada no ensaio de metalografia.

4. CONCLUSÃO

Foi possível obter uma parede pela técnica de MADA duplo arame misturando os arames UTP A DUR 600 e NCSW Rapid 952 T. Porém, a parede não apresentou boa uniformidade geométrica, gerando escorrimentos do material em alguns pontos. Do ponto de vista metalúrgico, houve mistura dos materiais na poça de fusão, sem que houvesse segregação entre os materiais. A mistura não apresentou trincas e teve como microestrutura resultante uma matriz martensítica com precipitação de carbonetos. Este resultado foi comprovado pela alta dureza do depósito. Os próximos passos da pesquisa deverão testar outros parâmetros de soldagem para obter uma parede com uniformidade geométrica, testar a resistência a abrasão da liga obtida e também a resistência a impacto para determinar se houve mudança na tenacidade.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a UNISATC por disponibilizar os materiais e equipamentos para a execução do trabalho.

Referências

[1] RODRIGUES, T. A.; FARIAS, F. W. Cipriano; ZHANG, K.; SHAMSOLHODAEI, A.; SHEN, J.; ZHOU, N.; SCHELL, N.; CAPEK, J.; POLATIDIS, E.; SANTOS, T. G.; OLIVEIRA, J.P. Wire and Arc additive manufacturing of 316L stainless steel/Inconel 625 functionally graded material: development and characterization. *Journal of Materials Research and Technology.* v. 21, p. 237-251, 2022.

[2] LI, Yuhang; WU, Shaojie; WANG, Jianshuo; WANG, Hu; KONG, Weichen; CHENG, Fangjie. Microestructure homogeneity and strength-toughness balance in submerged arc additive manufactured Mn-Ni-Mo high-strength steel by unique intrinsic heat treatment. *Journal of Materials Processing Tech.* v. 307, n. 117682, 2022.

[3] YI, Hao; JIA, Le; DING, Jialuo; LI, Huijun. Achieving material diversity in wire additive manufacturing: Leaping from alloys to composites via wire innovation. *International Journal Of Machine Tools and Manufacture.* V. 194, 2024.

[4] DAGOSTIM, Denis Kohler; DALEFFE, Anderson; CASAGRANDE, Henrique Cechinel; DE MARCH, Gilson; FERREIRA, Carlos Antônio; SCHAEFFER, Lirio; CASTELAN, Jovani; SILVA, Joélson Vieira da**.** Desenvolvimento do processo de manufatura aditiva com deposição localizada através da tecnologia GMAW duplo arame. *Observatório de la Economía Latinoamericana,* Curitiba, v. 22, n. 10, e7351, out. 2024.

[5] SHEN, Chen; MA, Yan; PAN, Zengxi; LI, Fang; ZHANG, Yuelong; WANG, Lin; LI, Yuchen; LI, Huijun; HUA, Xueming. A comprehensive review of twin-wire directed energy deposition-arc (TW-DED-arc) process: An in-situ alloying based additive manufacturing approach for intermetallics. *Journal of Manufacturing Processes*, v. 141, p. 296-318, 2025.

[6] SOOD, Arjun; SCHIMMEL, Jim; BOSMAN, Marko; GOULAS, Constantinos; POPOVICH, Vera; HERMANS, Marcel J. M. Fabrication of low thermal expansion Fe–Ni alloys by in-situ alloying using twin-wire arc additive manufacturing. *Materials & Design*, v. 240, artigo 112837, abr. 2024.

[7] QI, Zewu; CONG, Baoqiang; QI, Bojin; SUN, Hongye; ZHAO, Gang; DING, Jialuo. Microstructure and mechanical properties of double-wire + arc additively manufactured Al-Cu-Mg alloys. Journal of Materials Processing Technology, v. 255, p. 347-353, 2018.

[8] THÉODORE, J.; COUTURIER, L.; GIRAULT, B.; CABEZA, S.; PIRLING, T.; RENAUD, F.; BAZIN, G.; COURANT, B. Relationship between microstructure, and residual strain and stress in stainless steels in-situ alloyed by double-wire arc additive manufacturing (D-WAAM) process. *Materialia.* v. 30, n. 101850, 2023.

[9] YADAV, Ashish; SRIVASTAVA, Manu; JAIN, Prashant K. Design and Fabrication of wire ard additive manufacturing setup and enhanced tailored properties of dissimilar steel additively deposited by WAAM process. *Structures***.** v. 72. n. 108228, 2025.

44º SENAFOR

3nd International Conference on Innovation in Materials and Manufacturing
Hotel Plaza São Rafael – P. Alegre RS, October 1-3, 2025 – Brazil/RS

Tubos Poliméricos Flexíveis Impressos em 3D para Aplicações Vasculares

Jeanne Louise Fernandes Jesus (1)
Paola Lucchese Schütz (1)
Dihogo Araújo Galdino dos Santos (2)
Maria Eulália Danelon (2)
Eduardo Pereira (3)
Paola Lucchese Schutz (2)
Sílvio César Perini (4)
Luiz Carlos Bodanese (4)
Carlos Alexandre dos Santos (2)
Rosane Angélica Ligabue (2)

(1) Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS) / Programa de Pós-graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais
(2) Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS) / Escola Politécnica
(3) Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS) / Centro de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico IDEIA
(4) Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS) / Escola de Medicina

Resumo

Este estudo investiga o uso de poliuretanos termoplásticos (TPUs) processados por impressão 3D na fabricação de tubos flexíveis para aplicações vasculares. Três filamentos de TPU de diferentes durezas foram impressos por modelagem por deposição fundida (FDM) e caracterizadas quanto à morfologia (microscopia eletrônica de varredura), estabilidade térmica (DSC e TGA), propriedades mecânicas (ensaio de tração) e resistência à absorção de fluido (teste de inchamento). Os resultados indicam estrutura homogênea, estabilidade térmica até 250 °C e desempenho mecânico compatível com exigências biomédicas. O TPU T-65D-B apresentou maior alongamento e resistência à tração, destacando-se como o mais promissor. Os achados reforçam o potencial da manufatura aditiva na personalização de dispositivos médicos vasculares.

Palavras-chave: Impressão 3D; enxertos vasculares; poliuretano termoplástico

3D Printed Flexible Polymeric Tubes for Vascular Applications

Abstract

This study investigates the use of 3D-printed thermoplastic polyurethanes (TPUs) in the fabrication of flexible tubing for vascular applications. Three TPU filaments of varying hardness were printed using fused deposition modeling (FDM) and characterized for morphology (scanning electron microscopy), thermal stability (DSC and TGA), mechanical properties (tensile test), and resistance to fluid absorption (swelling test). The results indicate a homogeneous structure, thermal stability up to 250°C, and mechanical performance compatible with biomedical requirements. TPU T-65D-B exhibited the highest elongation and tensile strength, standing out as the most promising. These findings reinforce the potential of additive manufacturing in the customization of vascular medical devices.

Keywords: 3D printing; vascular grafts; thermoplastic polyurethane

1. Introdução

No campo da engenharia biomédica, especialmente na área vascular, a fabricação de tubos poliméricos flexíveis para enxertos ainda é um desafio. Esses dispositivos precisam mimetizar as propriedades mecânicas dos tecidos vasculares nativos, suportar as dinâmicas fisiológicas e garantir biocompatibilidade, evitando complicações como rejeição e trombose (VEITH et al., 1986; ZIEGLER et al., 2017). Nesse contexto, a manufatura aditiva — com destaque para a modelagem por deposição fundida (Fused Deposition Modeling, FDM) — tem se consolidado como alternativa promissora para a produção de dispositivos médicos personalizados, permitindo ajustes precisos de forma, estrutura e propriedades funcionais (ZHOU et al., 2024).

Entre os materiais utilizados na impressão 3D, os poliuretanos termoplásticos (TPUs) se destacam por sua flexibilidade, resistência mecânica, facilidade de processamento e potencial para modificação química e biodegradabilidade (PADILHA; SICILIANO Jr., 2005; FERREIRA et al., 2023). Essas características tornam o TPU especialmente atrativo para aplicações biomédicas, incluindo dispositivos implantáveis que exigem desempenho mecânico confiável e compatibilidade biológica (HASSAN et al., 2023; LI et al., 2022).

Os implantes vasculares de poliuretano apresentam potencial como alternativas aos materiais comerciais, como Dacron e PTFE, devido à sua versatilidade e capacidade de adaptação estrutural. TPUs podem ser processados para formar enxertos, cateteres ou stents com propriedades ajustáveis às demandas clínicas específicas (VANDERWEELE et al., 2022), aspecto essencial em doenças cardiovasculares, como aterosclerose e fístulas arteriovenosas. A engenharia de tecidos e a medicina regenerativa têm investido na integração de propriedades mecânicas personalizáveis com respostas biológicas favoráveis, visando otimizar o desempenho funcional desses implantes (GEBISA; LABRINCHA, 2020; MOURYA et al., 2023).

Materiais comerciais, como o PTFE, apresentam estabilidade estrutural elevada, mas rigidez limita o manuseio cirúrgico, enquanto o Dacron oferece maior flexibilidade e facilidade de aplicação, porém com limitações em termos de homogeneidade e personalização. O presente estudo visa, portanto, identificar um material que supere o PTFE e se aproxime do desempenho do Dacron, explorando o potencial de TPUs com diferentes durezas para equilibrar flexibilidade, resistência mecânica e estabilidade estrutural em tubos vasculares personalizados (RANDELL et al., 2023; AL-ZYOUD et al., 2023).

Para tanto, três filamentos de TPU com diferentes durezas foram processados por FDM e caracterizados quanto à morfologia (microscopia eletrônica de varredura), estabilidade térmica (DSC e TGA), propriedades mecânicas (ensaio de tração) e resistência à absorção de fluido (teste de inchamento). Os parâmetros de impressão foram ajustados considerando dimensões e espessuras típicas de enxertos comerciais de Dacron e PTFE (VEITH et al., 1986; ZIEGLER et al., 2017), garantindo estruturas cilíndricas uniformes e compatíveis com condições simuladas de aplicação clínica.

A impressão 3D, também chamada de prototipagem rápida, permite a reprodução de objetos tridimensionais por deposição sucessiva de camadas finas, viabilizando a produção de estruturas complexas e com controle dimensional preciso (ZHOU et al., 2024; BOCCATO, 2006; CRESWELL, 2007). Essa abordagem amplia a possibilidade de criar enxertos vasculares personalizados e funcionais de forma mais eficiente e econômica (SALOMON, 2004).

2. Processamento da Impressão 3D dos Dispositivos Vasculares

Para a fabricação dos tubos, foram selecionados três filamentos de TPU com diferentes durezas, visando identificar formulações que superassem o PTFE e se aproximassem do Dacron (PADILHA; SICILIANO Jr., 2005; LI et al., 2022).

A impressão 3D por FDM foi escolhida devido à capacidade de produzir estruturas com geometria controlada e propriedades ajustáveis, essenciais para aplicações biomédicas (FERREIRA et al., 2023; HASSAN et al., 2023).

O desenvolvimento incluiu três etapas principais:

1. Modelagem digital: os tubos foram projetados em software CAD, considerando variações de diâmetro e espessura de parede com base em parâmetros fisiológicos reais (RANDELL et al., 2023; GEBISA; LABRINCHA, 2020).
2. Parâmetros de impressão: temperatura do extrusor (220–250 °C), velocidade (30–50 mm/s), altura da camada (0,2 mm) e temperatura da mesa (50–60 °C) foram otimizadas para cada TPU, garantindo fidelidade geométrica e uniformidade estrutural (MOURYA et al., 2023).
3. Controle dimensional e inspeção estrutural: após a impressão, os dispositivos foram medidos com paquímetro digital e analisados por MEV, avaliando rugosidade, defeitos e conformidade com os modelos (ZHOU et al., 2024; FERREIRA et al., 2023).

As análises morfológica, térmica, mecânica e de estabilidade em meio aquoso permitiram caracterizar cada TPU, avaliando sua adequação como alternativa a materiais comerciais (VANDERWEELE et al., 2022; VEITH et al., 1986).

3. Metodologia

3.1 Materiais e métodos

A presente pesquisa foi desenvolvida com base em revisão bibliográfica sistemática, utilizando métodos que integram conhecimentos da Biblioteconomia e Documentação, conforme Salomon (2004), com aplicação prática em ciências de materiais e engenharia biomédica. Essa abordagem envolve a identificação, seleção e análise crítica da literatura científica, bem como a organização e síntese dos dados relevantes para o estudo (Boccato, 2006).

O método considerou artigos científicos, periódicos, monografias e livros nacionais e internacionais, publicados em português, inglês e espanhol, com foco em polímeros termoplásticos para aplicações médicas, incluindo propriedades mecânicas, biocompatibilidade, estabilidade estrutural e respostas inflamatórias e infecciosas. A pesquisa buscou ainda conectar os achados bibliográficos à aplicação prática de termoplásticos flexíveis como TPU, considerando seu potencial para o desenvolvimento de dispositivos médicos vasculares e enxertos personalizados.

4.Caracterização dos poliuretanos termoplásticos

4.1. Análise morfológica

A superfície e a qualidade estrutural das amostras impressas foram avaliadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) em equipamento FEI Inspect F50 no modo de captura de elétrons secundários (SE) disponível no Laboratório Central de Microscopia e Microanálise (LabCEMM) da PUCRS. As amostras foram dispostas em *stubs* e recobertas com uma fina camada de ouro. Para a obtenção das micrografias foi aplicada uma voltagem de 10 kV.

4.2. Análise Térmica

Utilizou-se a calorimetria exploratória diferencial (DSC) para determinação das temperaturas de transição vítrea (Tg) e fusão (Tm), e análise termogravimétrica (TGA) para avaliação da temperatura de degradação (Td), considerando 10% de perda de massa.

O equipamento utilizado foi TA Instruments modelo Q20, em um intervalo de temperatura de -100 a 250 °C com uma variação de 10 °C/min em atmosfera de nitrogênio. Já as análises termogravimétricas foram realizadas com o modelo Q600, variando da temperatura ambiente até 1200 °C, com uma taxa de aquecimento de 10°C/min em atmosfera de nitrogênio.

4.3. Análise mecânica

Ensaios de tração foram realizados para determinar alongamento máximo (%) e módulo de elasticidade. O ensaio de tração foi realizado em Máquina de ensaio Universal do tipo eletromecânica - Schimadzu, a partir da aplicação de uma carga de tração através da célula de carga 20KN até sua ruptura. A norma ASTM D 638 - Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics determina as condições necessárias padronizadas para realização do teste em polímeros.

Os parâmetros operacionais utilizados foram: Velocidade de ensaio: 5 mm/min; Célula de carga: 20 KN; Distância inicial entre garras: 50 mm; Mordentes planos recartilhados; Temperatura: ambiente 25 °C; Ensaios mecânicos: realizados para avaliar a resistência à tração, módulo elástico e elongação dos materiais, seguindo norma ASTM D638. Máquina de ensaio universal do tipo eletromecânica e capacidade máxima de 300 KN;

Essas análises permitiram selecionar os filamentos com desempenho mais adequado para uso em impressão 3D de tubos vasculares, considerando critérios de

elasticidade, resistência, estabilidade térmica e compatibilidade com o processo de extrusão.

4.4 Ensaio de inchamento

Os tubos foram imersos em solução salina isotônica a 37 °C, com monitoramento de variação de massa e integridade estrutural ao longo de 30 dias para simular exposição ao meio biológico. O teste de inchamento foi realizado em triplicata com corpos-de-prova nas dimensões 1cmx1cm, baseado em método descrito na norma ASTM D570 (2010).

Primeiramente foi feita a pesagem do corpo de prova seco e então, imerso em PBS durante um período determinado (até 30 dias) com temperatura controlada de 37°C. Para a pesagem após o inchamento, foi retirado o excesso de água na superfície do polímero com papel filtro.

5. Resultados e Discussão

5.1. Análise Morfológica

As micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) permitiram avaliar superfícies internas e externas dos tubos impressos em 3D, evidenciando o padrão de deposição em camadas característico da FDM (FERREIRA et al., 2023; GEBISA; LABRINCHA, 2020).

Foram observadas diferenças de uniformidade entre materiais e faces do tubo, bem como descontinuidades, poros e falhas intercamadas, indicadores da adesão entre camadas e estabilidade dimensional (BOCCATO, 2006; CRESWELL, 2007).

A morfologia impacta diretamente o desempenho biológico e mecânico do dispositivo. Superfícies internas lisas reduzem a turbulência do fluxo sanguíneo e a adesão plaquetária, minimizando risco de trombose (VEITH et al., 1986; ZIEGLER et al., 2017).

Superfícies externas uniformes favorecem integração tecidual e resposta inflamatória controlada (AL-ZYOUD et al., 2023; FERREIRA et al., 2023). Comparando diferentes formulações de TPU, foi possível selecionar materiais com microestrutura consistente, essenciais para o desenvolvimento de enxertos vasculares personalizados, seguros e de baixo custo (RANDELL et al., 2023; PADILHA; SICILIANO JR., 2005).

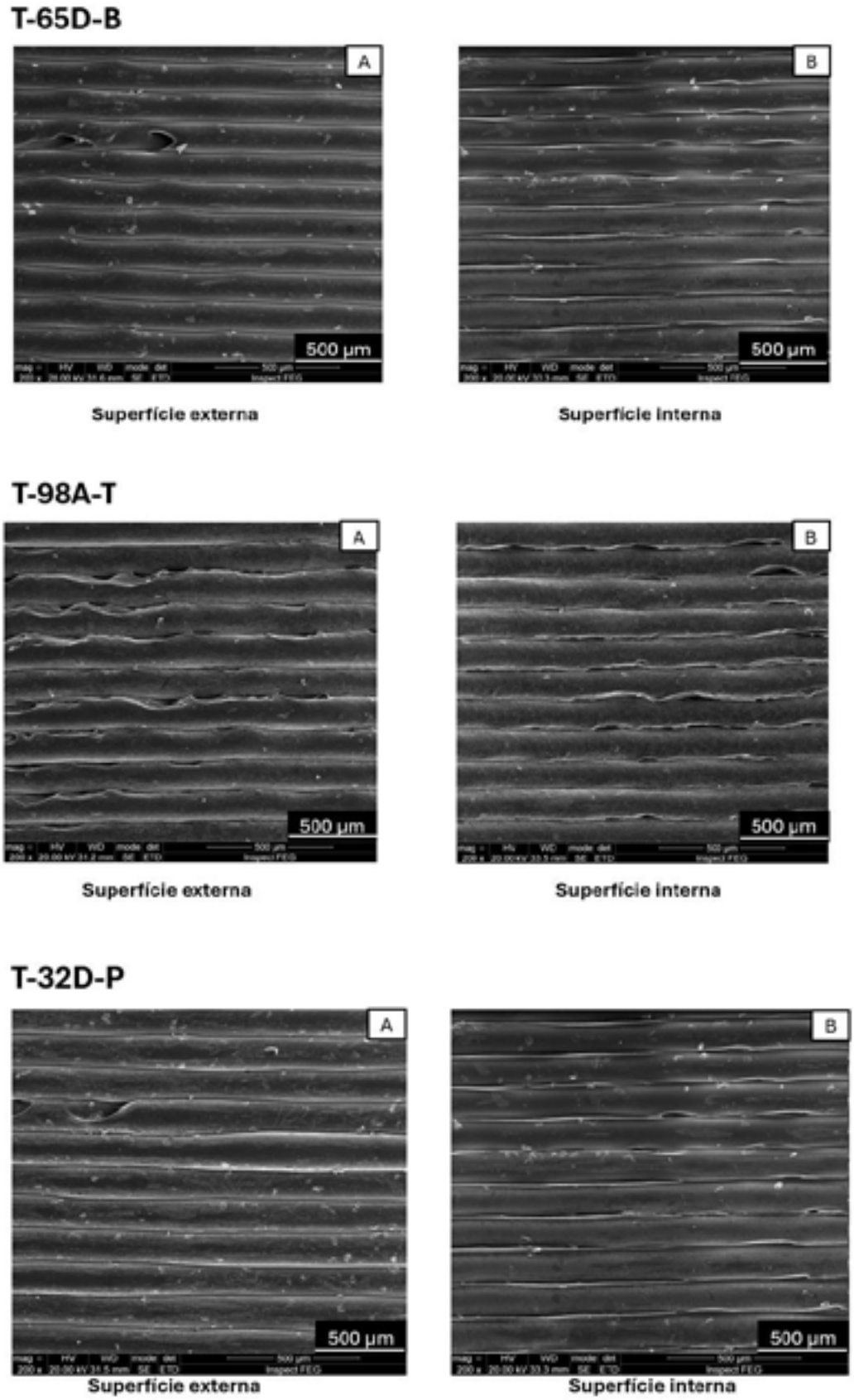


Figura 5.1. Resultado da análise das morfologias de TPU processadas por impressão 3D para as amostras (T-65D-B, T-32D-P e T-98A-T).

5.2. Análise Térmica

A análise por calorimetria diferencial exploratória (DSC) revelou picos de fusão de 171,2 °C (T-32D-P), 172,4 °C (T-65D-B) e 181,9 °C (T-98A-T), indicando variações na cristalinidade e na composição química. Picos bem definidos sugerem presença significativa de segmentos duros de copolímeros (FERREIRA et al., 2023; HASSAN et al., 2023).

Os TPUs processados por impressão 3D apresentaram comportamento térmico semelhante ao de filmes moldados por compressão, com leve influência da orientação molecular induzida pela deposição camada a camada (ZHOU et al., 2024; SALOMON, 2004). As amostras mantiveram estabilidade térmica até aproximadamente 250 °C, seguida por degradação em múltiplas etapas entre 294 °C e 450 °C, associadas à quebra de ligações uretânicas e degradação de segmentos macios (RANDELL et al., 2023). Formulações mais rígidas demonstraram maior resistência térmica (FERREIRA et al., 2023; XU; WANG, 2011).

5.3. Análise mecânica

Complementarmente, foram realizados ensaios de tração para avaliar o desempenho mecânico das formulações de TPU. A tabela abaixo apresenta os resultados obtidos para tensão máxima na ruptura (N/m²) e deslocamento máximo até a ruptura (mm), permitindo a análise do comportamento dos materiais frente à deformação.

A amostra T-65D-B apresentou o melhor desempenho, com maior resistência (102 ± 8 N/m²) e maior alongamento (13 ± 2 mm). A T-98A-T, embora com resistência intermediária (83 ± 10 N/m²), mostrou o menor deslocamento (6 ± 1 mm), indicando comportamento mais rígido. Já a T-32D-P apresentou a menor resistência (65 ± 12 N/m²), mas um deslocamento relativamente elevado (10 ± 1 mm), sugerindo maior flexibilidade, porém menor capacidade de suportar cargas.

Esses resultados são cruciais para a seleção de materiais em aplicações vasculares por impressão 3D, pois as propriedades mecânicas determinam a capacidade do dispositivo de resistir à pressão do fluxo sanguíneo e acompanhar os movimentos naturais dos tecidos. Um equilíbrio entre resistência à tração e flexibilidade é essencial para garantir desempenho funcional e durabilidade do enxerto.

Segundo Hassan et al. (2023), TPUs com maior proporção de segmentos duros tendem a apresentar maior resistência mecânica, enquanto a presença de segmentos macios promove maior elasticidade — ambos aspectos ajustáveis durante a formulação. Li et al. (2022) também destacam que materiais utilizados em próteses

vasculares devem apresentar propriedades compatíveis com o tecido nativo, a fim de evitar complicações biológicas. Nesse contexto, a amostra T-65D-B se mostra promissora por combinar resistência e deformabilidade, características desejáveis para dispositivos médicos implantáveis (FERREIRA et al., 2023; RANDELL et al., 2023).

5.4. Estabilidade em meio aquoso

Por fim, foi realizado o teste de inchamento com corpos-de-prova de 1 cm × 1 cm, imersos em solução tampão PBS a 37 °C e avaliados por até 30 dias, conforme protocolo adaptado da norma ASTM D570 (2010). O percentual de inchamento ao longo do tempo, com tendência de estabilização entre 12% e 14% após aproximadamente 15 dias de imersão.

Esse comportamento indica que os materiais absorvem umidade até atingirem um platô, refletindo um equilíbrio entre absorção e retenção de fluido nos domínios polares do polímero. Tal resposta é relevante para aplicações vasculares, pois o inchamento controlado está diretamente relacionado à estabilidade dimensional e à integridade mecânica do enxerto em ambiente fisiológico.

Materiais que apresentam inchamento moderado e estável ao longo do tempo tendem a manter sua forma e funcionalidade no organismo, minimizando o risco de deformações que possam comprometer o fluxo sanguíneo ou a interação com os tecidos (FERREIRA et al., 2023; Gebisa et al., 2020). TPUs com estrutura segmentada e presença equilibrada de grupos uretânicos oferecem excelente resistência à hidrólise (GEBISA; LABRINCHA, 2020; MOURYA et al., 2023), sendo altamente desejáveis para a engenharia de enxertos flexíveis e biocompatíveis.

Assim, os dados obtidos contribuem para a seleção racional de formulações com melhor desempenho a longo prazo em aplicações biomédicas personalizadas via impressão 3D.

6. Conclusão

Este estudo demonstrou o potencial de TPUs impressos em 3D como materiais promissores para enxertos vasculares personalizados, destacando a formulação T-65D-B pelo seu desempenho mecânico superior.

Como continuidade, serão realizados testes de hemocompatibilidade, biodegradação in vitro e simulações in vivo, permitindo avaliar a interação com o ambiente biológico, estabilidade estrutural e degradação controlada. Esses estudos fornecerão subsídios para futuras aplicações clínicas, consolidando os TPUs

impressos em 3D como alternativas seguras, eficazes e personalizáveis a enxertos vasculares comerciais.

7. Agradecimentos

Os autores agradecem a Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul e a CAPES por proporcionarem infraestrutura no desenvolvimento deste trabalho. Além da Secretaria de Inovação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul (SICT-RS) pelo suporte financeiro (Projeto . 23/2500-0000820-0).

Referências Bibliográficas

Al-Zyoud, W.; Haddadin, D.; Hasan, S. A.; Jaradat, H.; Kanoun, O. Biocompatibility Testing for Implants: A Novel Tool for Selection and Characterization. *Materials (Basel)*, v. 16, n. 21, p. 6881, 2023. doi: 10.3390/ma16216881.

BOCCATO, Vânia Regina Casari. Metodologia da pesquisa bibliográfica na área odontológica e o artigo científico como forma de comunicação. *Revista de Odontologia da Universidade Cidade de São Paulo*, v. 18, n. 3, p. 265–274, set.–dez. 2006.

CRESWELL, John W. Projeto de pesquisa: métodos qualitativo, quantitativo e misto. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2007.

FERREIRA, A. et al. Evaluation of layer adhesion and morphological quality in 3D printed TPU for biomedical applications. *Journal of Applied Polymer Science*, v. 140, n. 8, p. e53456, 2023.

GEBISA, A. W.; LABRINCHA, J. A. 3D printing of polymer–polymer composites: A review on process, applications, and challenges. *Materials Today Communications*, v. 24, p. 101024, 2020.

HASSAN, M. A. et al. Additive Manufacturing of Thermoplastic Polyurethanes: Recent Advances, Challenges, and Opportunities. *Polymers*, v. 15, n. 2, p. 376, 2023.

LI, J. et al. Surface modification strategies for 3D-printed vascular grafts: A review of recent advances. *Biofabrication*, v. 14, n. 3, p. 032001, 2022.

MOURYA, A. K. et al. Tuning the morphologies of ZnO for enhanced photocatalytic activity. *Inorganic Chemistry Communications*, v. 154, p. 110850, 2023.

PADILHA, A. F.; SICILIANO Jr., F. Encruamento, recristalização, crescimento de grão e textura. 3. ed. São Paulo: ABM, 2005.

RANDELL, M. et al. Biomechanical design of 3D printed vascular scaffolds: A systematic approach. *Advanced Healthcare Materials*, v. 12, n. 4, p. 2202190, 2023.

SALOMON, D. V. Como fazer uma monografia. 11. ed. São Paulo: Martins Fontes, 2004.

VANDERWEELE, D. J. et al. Polyurethane-based vascular grafts: a review of recent developments and future directions. *Advanced Healthcare Materials*, v. 11, n. 9, p. 2200054, 2022. DOI: https://doi.org/10.1002/adhm.202200054

VEITH, F. J. et al. Six-year prospective multicenter randomized comparison of PTFE and Dacron grafts. *Journal of Vascular Surgery*, v. 3, n. 1, p. 104–114, 1986.

XU, S.; WANG, Z. L. One-dimensional ZnO nanostructures: solution growth and functional properties. *Nano Research*, v. 4, p. 1013–1098, 2011.

ZHOU, Longfei et al. Additive manufacturing: a comprehensive review. *Sensors*, v. 24, n. 9, p. 2668, 2024.

ZIEGLER, K. R. et al. A review of graft materials in peripheral bypass surgery. *Journal of Surgical Research*, v. 209, p. 77–89, 2017.

DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE FILMES POLIMÉRICOS OBTIDOS PELO MÉTODO *CASTING* A PARTIR DE FIBRAS DE COLÁGENO BOVINO

Larissa Madrid[1]

Profª Drª Patrice Monteiro de Aquim[2]

RESUMO

Nas últimas décadas, pesquisas voltadas ao desenvolvimento de filmes naturais alternativos têm ganhado destaque, impulsionadas pela busca por materiais de rápida degradação e isentos de derivados do petróleo. Esses materiais desempenham papel essencial na mitigação da poluição ambiental, contribuindo para a redução da geração de microplásticos. Filmes obtidos a partir de fontes renováveis não apenas promovem a sustentabilidade e a redução das emissões de carbono, como também oferecem maior segurança à saúde humana, por não incorporarem aditivos químicos potencialmente nocivos. Dentre as matérias-primas de interesse, o colágeno bovino se destaca por sua elevada capacidade filmogênica e por ser um subproduto amplamente disponível na indústria. Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo desenvolver filmes poliméricos à base de fibras de colágeno bovino. A metodologia consistiu na formulação de filmes empregando fibras de colágeno em duas granulometrias distintas (flocada e em pó), glicerol como plastificante e amido como aditivo polimérico. Inicialmente, os componentes foram pré-formulados; as fibras de colágeno passaram por hidratação e posterior processamento. Após a etapa de estabilização, os filmes foram obtidos pelo método casting e submetidos à secagem natural sob temperatura ambiente (25–30 °C), por um período de 3 a 4 dias. Por fim, foram conduzidas avaliações visuais, com o objetivo de verificar aspectos de regularidade de espessura, transparência e presença de bolhas ou fissuras, e de tato, a fim de avaliar as flexibilidades obtidas. Os resultados indicaram que as formulações contendo fibras flocadas apresentaram maior irregularidade estrutural, com rugosidade superficial acentuada, transparência reduzida, presença de zonas opacas e maior incidência de bolhas. Em contrapartida, as formulações com fibras em pó resultaram em filmes mais homogêneos, com melhor acabamento superficial e maior transparência. Conclui-se, portanto, que a granulometria das fibras de colágeno exerce influência considerável nas propriedades visuais e táteis dos filmes, sendo as fibras em pó mais adequadas para a obtenção de materiais com melhor uniformidade e qualidade estética, reforçando o potencial do colágeno bovino como matriz para o desenvolvimento de filmes poliméricos.

Palavras-chave: Filmes poliméricos; Colágeno; Amido; Glicerol.

[1] Engenharia Química pela Universidade Feevale. E-mail: larissamadrid01@gmail.com

[2] Doutora em Engenharia Química pela UFRGS, professora e pesquisadora do Instituto de Ciências Criativas da Universidade Feevale. E-mail: patrice@feevale.br

ABSTRACT

In recent decades, research focused on developing natural alternative films has gained prominence, driven by the search for materials that degrade rapidly and are free of petroleum derivatives. Such materials play an essential role in mitigating environmental pollution by helping to reduce the generation of microplastics. Films derived from renewable sources not only promote sustainability and lower carbon emissions but also offer greater safety for human health, as they do not incorporate potentially harmful chemical additives. Among the raw materials of interest, bovine collagen stands out for its high film-forming capacity and for being a widely available by-product of the industry. In this context, the present study aimed to develop polymeric films based on bovine collagen fibers. The methodology involved formulating films using collagen fibers of two distinct particle sizes (flaked and powdered), glycerol as a plasticizer, and starch as a polymeric additive. Initially, the components were pre-formulated; the collagen fibers underwent hydration followed by further processing. After the stabilization stage, the films were produced using the *casting* method and dried naturally at room temperature (25–30 °C) for a period of three to four days. Finally, visual assessments were carried out to evaluate thickness uniformity, transparency, and the presence of bubbles or cracks, as well as tactile evaluations to determine the flexibility achieved. The results indicated that formulations containing flaked fibers showed greater structural irregularity, with pronounced surface roughness, reduced transparency, the presence of opaque areas, and a higher incidence of bubbles. In contrast, formulations with powdered fibers yielded more homogeneous films, exhibiting smoother surfaces and greater transparency. It can therefore be concluded that the particle size of collagen fibers exerts a significant influence on the visual and tactile properties of the films, with powdered fibers proving more suitable for producing materials of superior uniformity and aesthetic quality, reinforcing the potential of bovine collagen as a matrix for the development of polymeric films.

Keywords: Polymeric films; Collagen; Starch; Glycerol

1 INTRODUÇÃO

A demanda por polímeros sintéticos derivados de hidrocarbonetos, iniciada há mais de 7 décadas, consolidou-se como um dos marcos mais significativos da produção de materiais pela humanidade. Entretanto, o uso extensivo de plásticos tem suscitado intensos debates devido aos impactos ambientais associados ao seu ciclo de vida (Geyer, 2020; Ocak, 2021). Produzidos majoritariamente a partir da nafta, um derivado do petróleo, os plásticos convencionais apresentam elevada versatilidade, boas propriedades físico-mecânicas e baixo custo. Todavia, a ausência de biodegradabilidade, aliada à sua elevada resistência, prolonga os ciclos degradativos por séculos, resultando na geração de resíduos persistentes que podem se fragmentar em macro, micro e nanopartículas (Jacobs, 2020).

Dados recentes do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente evidenciam a gravidade do problema: a geração anual de resíduos plásticos saltou de 139 milhões de toneladas métricas em 2021 para 430 milhões em 2023, dos quais apenas 9% foram reciclados. Esse cenário representa custos sociais e ambientais estimados em 1,3 trilhões de dólares por ano, ressaltando a urgência por alternativas sustentáveis (PNUMA,2023). Nesse contexto, materiais biodegradáveis de origem vegetal e animal têm ganhado destaque, por reduzirem o acúmulo de resíduos, mitigarem a formação de microplásticos e minimizarem riscos à saúde humana (Kosseva *et al.,* 2020; Sihori *et al,* 2021).

Entre as alternativas estudadas, os filmes naturais à base de colágeno bovino se destacam como uma proposta inovadora e sustentável. O colágeno, proteína estrutural amplamente disponível nos subprodutos da indústria coureira, apresenta elevada capacidade filmogênica e propriedades adequadas para a produção de filmes poliméricos (Ocak, 2021). No Brasil, a produção de couro bovino alcançou cerca de 285 milhões de m² apenas entre janeiro e setembro de 2024, resultando em ganhos aproximados de 1,1 bilhão

de dólares (CICB, 2024). Para cada tonelada de couro processado, são gerados em torno de 120 kg de aparas e raspas ricas em colágeno, cuja valorização possibilita não apenas a mitigação de impactos ambientais, mas também a integração à economia circular. Dessa forma, o aproveitamento desse subproduto como matriz polimérica agrega valor a resíduos industriais e reforça seu potencial como recurso estratégico para o desenvolvimento de filmes poliméricos (Pacheco; Ferrari, 2015; Pérez-Aguilar, Lacruz-Asaro, Arán-Aís, 2023; Allemann *et al,* 2024).

Diante deste cenário, o presente estudo tem como objetivo desenvolver filmes poliméricos a partir de fibras de colágeno bovino, explorando seu potencial como uma matriz sustentável.

2 FILMES POLIMÉRICOS

Segundo Horue *et al.* (2021), filmes poliméricos são biopolímeros derivados de polissacarídeos, proteínas e/ou lipídeos, capazes de formar matrizes coesas e contínuas. O método *casting* é o mais utilizado para sua obtenção, destacando-se pela simplicidade, versatilidade e eficiência, além de permitir a incorporação de diferentes componentes, o ajuste de propriedades e o controle de espessura (Tian *et al.,* 2018).

Conforme Rosseto (2019), o processo compreende três etapas: preparação da solução filmogênica, espalhamento em suporte plano e secagem por evaporação do solvente em baixas temperaturas, o que promove a concentração polimérica e a formação de uma rede tridimensional estável (Guerrero *et al.,* 2010; Martiny, 2020; Avila, 2020).

O Quadro 1 apresenta estudos que desenvolveram filmes poliméricos para distintas aplicabilidades.

Quadro 1 – Autores que desenvolveram filmes poliméricos e suas aplicações

Autor	Ano	Finalidade
Rosa	2024	Filmes de gelatina extraída de resíduos de couro *wet blue* para cobertura de solo agrícola
Leôncio	2022	Filmes poliméricos de amido extraído do caroço da jaca *(Artocarpus Heterophilus)* para utilização como curativo
Cappellaro	2020	Filmes de gelatina de pele caleirada, amido e açafrão para uso como embalagem de alimentos
Scopel	2020	Filmes de resíduo de *wet blue*, associado a plastificante e amido para uso na agroindústria como fita de plantio.

Fonte: Autora (2024).

As características funcionais dos filmes são acondicionadas pelas suas características físicas e pelas suas propriedades, que são resultado da relação entre as características físico-químicas da macromolécula que o forma e a formulação utilizada. Aditivos são geralmente aplicados com o intuito de melhorar as propriedades (Cazón, *et al.,* 2017).

Biopolímeros proteicos, como o colágeno, destacam-se pela abundância, biodegradabilidade e capacidade de formar filmes, embora apresentem fragilidade devido a zonas microcristalinas que se tornam quebradiças após a desidratação (Mohammadi *et al.,* 2018; Zink *et al.,* 2016). Sendo assim, habilmente são adicionados polissacarídeos, como o amido, a fim de aumentar a flexibilidade desses polímeros, diminuindo as zonas quebradiças e aumentando a transparência (Abedinia *et al.,* 2018; Mohammadi *et al.,* 2018).

Uma vez que as cadeias paralelas dessa substância formam pontes de hidroxilas de polímeros adjacentes após a gelatinização, o que reflete na diminuição de volume e afinidade do polímero base com a água, permitindo que o amido gelatinizado torne os filmes estáveis e flexíveis (Mali *et al.,* 2010; Zhang *et al.,* 2024). Adicionalmente, a água atua como veículo de transporte da matriz polimérica e formação de filme, reduz a temperatura vítrea diminuindo o ponto de fusão dos polímeros, se comportando como um plastificante da rede cristalina estrutural, além de promover dissolução (Santos, 2017; Pontes, 2022). Da mesma

forma, plastificantes como o glicerol são adicionados, sendo altamente compatíveis com proteínas devido ao seu caráter hidrofílico. Isso aumenta significativamente a plasticidade dos filmes, pois se interpolam entre as cadeias, garantindo mobilidade devido a redução das pontes de hidrogênio, e consequentemente potencializando as propriedades de resistência mecânica, flexibilidade e transparência (Rocha *et al.,* 2020; Moraes *et al.,* 2013).

Propriedades funcionais, sensoriais e nutricionais podem ser modificadas, quando se busca obter filmes comestíveis ou para recobrimento alimentício, para tal utilizam-se aditivos como aromatizantes, corantes, vitaminas e agentes microbianos (Horue *et al.,* 2021). Na sequência estão elucidadas as etapas metodológicas aplicadas ao estudo para a obtenção de filmes poliméricos à base de fibras de colágeno bovino.

3 METODOLOGIA

A metodologia foi estruturada em duas etapas principais: obtenção dos filmes e caracterização. As fibras de colágeno bovino utilizadas como o componente principal para a preparação dos filmes foram disponibilizadas pela empresa ANABE – Indústria e Comércio de Proteínas, em duas granulometrias diferentes padronizadas, sendo elas: flocada e em pó, diferenciadas apenas pela granulometria. Ademais, foram utilizados os insumos químicos glicerol (plastificante), amido de milho (polissacarídeo) e água destilada.

A Tabela 1 apresenta as diferentes formulações avaliadas para a obtenção dos filmes de colágeno bovino.

Tabela 1 – Formulações empregadas na produção dos filmes (quantidade em 100 mL de água)

Identificação	Fibras de colágeno (g)	Amido (g)	Glicerol (g)
B1	-	10	2,1
B2F/B2P	10	-	2,1
AF/AP	2,5	2,5	2
BF/BP	5	2	2,1
CF/CP	5	3	2,4
DF/DP	10	4	2,1

Legenda: “B1” – branco 1 sem colágeno; “B2F” e B2P” – branco 2 com colágeno; “F” e “P” – sufixos que se referem a presença das fibras de colágeno bovino flocadas e em pó, respectivamente, nas formulações.

Fonte: Autora (2025).

As formulações “AF e AP” foram baseadas em resultados prévios do grupo de pesquisa. As demais, “B, C e D”, foram preparadas com 2 a 16% de massa seca (amido, colágeno e glicerol) em água, variando-se o glicerol entre 20 e 30% em relação à soma de amido e colágeno, conforme adaptações metodológicas empregadas na produção de filmes naturais de amido e gelatina propostas por Fakhoury *et al.* (2012), Acosta *et al.* (2015) e Scopel (2020). As amostras controle (Brancos 1 e 2) foram produzidas a partir das proporções médias dos polímeros, e a quantidade final de glicerol correspondeu à formulação com melhor desempenho.

Após definidas as formulações, as fibras de colágeno foram hidratadas em água destilada sob agitação magnética por 30 min e posteriormente aquecidas entre 75 – 80 °C. Paralelamente, o amido foi diluído e gelatinizado em água destilada a 80 – 85 °C por 15 min (Rocha *et al.*, 2020; Backes, 2022). As soluções foram então combinadas e mantidas sob agitação por 10 min para completa homogeneização. O glicerol foi incorporado à mistura a 75 °C, permanecendo sob agitação até completa dissolução (Cappellaro, 2020). A solução filmogênica obtida foi resfriada gradualmente até 40 °C para garantir maior estabilidade antes da moldagem, sendo então os filmes obtidos pelo método *casting*, com secagem por evaporação do solvente. Para tal, as soluções filmogênicas estabilizadas foram vertidas sobre placas de teflon e espalhadas com extensômetro de 3 mm para uniformização da espessura, conforme disposto na Figura 1.

Figura 1 – Obtenção do filme com auxílio de extensômetro 3 mm

Fonte: Autora (2025).

A secagem dos filmes foi realizada em temperatura ambiente (25 – 30 ºC) por um período de 3 a 4 dias (Silva *et al.,* 2021). Após, eles foram acondicionados a 25 ºC por mais três dias, a fim de evitar a formação de bolores e favorecer a evaporação gradual do solvente, preservando a integridade da estrutura tridimensional do polímero (Hubner *et al.,* 2019; Araújo,2024). Passado o período de acondicionamento dos filmes, foram conduzidas avaliações visuais, com o objetivo de verificar aspectos de regularidade de espessura, transparência e presença de bolhas ou fissuras, e de tato, a fim de avaliar suas flexibilidades.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir das análises efetuadas foi possível identificar não conformidades estruturais e sensoriais que pudessem comprometer a reprodutibilidade das formulações. O Quadro 1 apresenta os resultados da avaliação visual qualitativa, conforme os critérios metodológicos descritos anteriormente.

Quadro 2 – Resultados da avaliação visual qualitativa

Identificação	Formação de filme	Transparência	Resistência a tração manual	Espessura
B1	Não	-	-	-
B2F	Não	-	-	-
B2P	Não	-	-	-
AF	Sim	Parcial	Rompe facilmente	Irregular, com zonas quebradiças
AP	Sim	Parcial	Rompe facilmente	Irregular, com zonas quebradiças
BF	Sim	Parcial, com zonas opacas	Não rompe facilmente	Irregular
BP	Sim	Parcial	Não rompe facilmente	Regular
CF	Sim	Parcial, com zonas opacas	Rompe facilmente	Irregular, com zonas quebradiças
CP	Sim	Parcial	Rompe facilmente	Irregular, com zonas quebradiças
DF	Sim	Parcial, com zonas opacas	Não rompe facilmente	Irregular
DP	Sim	Parcial, com zonas opacas	Não rompe facilmente	Irregular

Legenda: “B1” – branco 1 sem colágeno; “B2F” e B2P” – branco 2 com colágeno; “F” e “P” – sufixos que se referem a presença das fibras de colágeno bovino flocadas e em pó, respectivamente, nas formulações.
Fonte: Autora (2025).

As soluções filmogênicas “B1, B2F e B2P” não possibilitaram a formação de filmes, inferindo que a ausência de um dos componentes poliméricos - colágeno ou amido - nas condições operacionais adotadas, comprometeu a estruturação da matriz. Entretanto, as formulações “AF, AP, CF e CP”, apesar de formarem filmes e seguirem o padrão visual, romperam-se facilmente durante o teste de resistência à tração manual e exibiram irregularidades significativas na espessura, com zonas menos espessas e visivelmente quebradiças. Essas deficiências comprometem consideravelmente a estabilidade e a integridade do material, inviabilizando seu uso em aplicações que exigem uniformidade estrutural e resistência mínima.

Dessa forma, apenas as formulações “BF, BP, DF e DP”, apresentaram formação adequada de filmes e melhores propriedades visuais e mecânicas. Os filmes obtidos por essas formulações são ilustrados pela Figura 2.

Figura 2 – Filmes de fibra de colágeno bovino obtidos pelo método *casting*

Legenda: “BP” e “BF” – filmes obtidos pela formulação B, com fibras em pó e flocadas, respectivamente; “DP” e “DF” – filmes obtidos pela formulação D, com fibras em pó e flocadas, respectivamente.
Fonte: Autora (2025).

Visualmente, todos os filmes formados apresentaram características morfológicas distintas entre suas duas superfícies. A face em contato com a placa de Teflon durante o processo de secagem apresentou-se visualmente lisa e homogênea, possivelmente devido a superfície uniforme e antiaderente do substrato, que favorece a regularidade da disposição dos componentes. No entanto, a face exposta ao ambiente revelou uma textura rugosa, sendo mais perceptíveis nos filmes formulados com as fibras flocadas.

De forma geral, indica-se que as formulações contendo fibras flocadas, “BF e DF” apresentaram maior irregularidade estrutural, com rugosidade superficial acentuada, transparência reduzida, presença de zonas opacas e maior incidência de bolhas. Em contrapartida, as formulações com fibras em pó, “BP e DP” resultaram em filmes mais homogêneos, com melhor acabamento superficial e transparência. Atribui-se, segundo Ma *et al.* (2020) e Costa *et al.* (2021), que essas diferenças visuais se devem a maior granulometria das fibras flocadas, que dificultam a dispersão uniforme dos componentes na matriz polimérica, favorecendo a formação de zonas irregulares, descontínuas e com bolhas também potencializado pelas taxas de evaporação mais lentas no decorrer do processo *casting* que resultam em estruturas cristalinas menos ordenadas, interferindo na uniformidade estrutural e, consequentemente, no desemprenho mecânico (Kramar *et al.,* 2023).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Conclui-se, a partir dos pontos expostos, que a granulometria das fibras de colágeno exerce influência considerável nas propriedades visuais e táteis dos filmes, sendo as fibras em pó mais adequadas para a obtenção de materiais com melhor uniformidade e qualidade estética, reforçando o potencial do colágeno bovino como matriz para o desenvolvimento de filmes poliméricos.

Referências

ABEDINIA, Ahmadreza et al. **Preparation and characterization of a novel biocomposite based on duck feet gelatin as alternative to bovine gelatin.** *Int. J. Biol. Macromol.,* v. 109, p. 855-862, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.11.051>. Acesso em: out. 2024.

Allemann, M.N., Tessman, M., Reindel, J. *et al.* **Rapid biodegradation of microplastics generated from bio-based thermoplastic polyurethane.** *Scientific Reports.* v. 14, 6036. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-56492-6>. Acesso em: jun. 2025.

ARAÚJO, Luís Otávio de. **Produção de filmes compósitos à base de Gelatina, Bentonita e Sulfanilamida para aplicação como cobertura para feridas.** 2024. 114 p. Tese (Doutorado em Química) - Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2024.

AVILA, Luisa Bataglin et al. **Carrageenan-based films incorporated with jaboticaba peel extract: An innovative material for active food packaging.** *Molecules*, v. 25, n. 23, p. 5563, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/molecules25235563> Acesso em: set. 2024.

BACKES, Francis Lais. **Desenvolvimento de recobrimentos poliméricos comestíveis a base de amido e gelatina para aplicação por multicamadas em uvas.** 2022. 88 p. Dissertação (Mestrado) – Mestrado Profissional em Tecnologia de Materiais e Processos Industriais, Universidade Feevale, Novo Hamburgo, 2022.

CAPPELLARO, Gabriela Costa. **Desenvolvimento de polímero biodegradável a base de gelatina de pele bovina caleirada.** 2020. 97 p. Dissertação (Mestrado) – Mestrado Profissional em Tecnologia de Materiais e Processos Industriais, Universidade Feevale, Novo Hamburgo, 2020.

CAZÓN, P. et al. **Polysaccharide-based films and coatings for food packaging : A review.** *Food Hydrocolloids*, v. 68, p. 136–148, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.09.009>. Acesso em: out. 2024.

COSTA, Gilmar Freire da et al. **Collagen films, cassava starch and their blends: Physical-chemical, thermal and microstructure properties.** *Packaging Technology and Science an Internacional Journal.* p. 1-12, 2021. DOI: 10.1002/pts.2621. Acesso em: abr. 2025.

FAKHOURI, Farayde Matta et al. **Edible films and coatings based on starch/gelatin: Film properties and effect of coatings on quality of refrigerated Red Crimson grapes.** *Postharvest*

Biology and Technology, v. 109, p. 57-64, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2015.05.015>. Acesso em: set. 2024.

GUERRERO, P. et al. **Mechanical and thermal properties of soy protein films processed by casting and compression.** *Journal of Food Engineering,* v. 100, n. 1, p. 145-151, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.03.039>. Acesso em: set. 2024.

HORUE, Manuel et al. **Microbial production and recovery of hybrid biopolymers from wastes for industrial applications-a review.** *Bioresource Technology,* v. 340, p. 125671, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125671>. Acesso em out. 2024.

JACOBS, Vanessa et al. **Produção e caracterização de biofilmes de amido incorporados com polpa de acerola.** *Revista Iberoamericana de Polímeros*, v. 21, n. 3, p. 107-119, 2020.

KANMANI, Paulraj; RHIM, Jong-Whan. **Development and characterization of carrageenan/grapefruit seed extract composite films for active packaging.** *Int. J. Biolog. Macrom.,* v. 68, p. 258-266, 2014. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2014.05.011. Acesso em: set. 2024.

MA, Yunhao et al. **A top-down approach to improve collagen film's performance: The comparisons os macro, micro and nano sized fibers.** *Food Chemistry.* v. 309. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125624>. Acesso em: abr. 2025.

MALI, Suzana; GROSSMANN, Maria Victória Eiras; YAMASHITA, Fábio. **Filmes de amido: produção, propriedades e potencial de utilização.** Seminário: Ciências Agrárias, v. 31, n. 1, p. 137-155, 2010. Disponível em: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=445744095013>. Acesso em: set. 2024.

MARTINY, Thamiris R. et al. **A novel biodegradable film based on κ-carrageenan activated with olive leaves extract.** *Food Science & Nutrition,* v. 8, n. 7, p. 3147-3156, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/fsn3.1554>. Acesso em: set. 2024.

MOHAMMADI, Reza et al. **Physico-mechanical and structural properties of eggshell membrane gelatin-chitosan blend edible films.** *International Journal of Biological Macromolecules,* v. 107, p. 406-412, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.09.003>. Acesso em: out. 2024.

Ocak, B. **Development of novel collagen hydrolysate bio-nanocomposite films extracted from hide trimming wastes reinforced with chitosan nanoparticles.** *Environ Sci Pollut Res*., v. **28**, p. 35145–35156. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13306-w>. Acesso em: jun. 2025.

PACHECO, José Wagner Faria; FERRARI, Walter Alves. **Guia técnico ambiental de curtumes.** 2ª ed. São Paulo: CETESB, 2015. Disponível em: <https://repositorio.cetesb.sp.gov.br/handle/123456789/2393>. Acesso em: set. 2024.

PÉREZ, Serge; BERTOFT, Eric. **The molecular structures of starch components and their contribution to the architecture of starch granules: A comprehensive review.** *Starch-Stärke,* v. 62, n. 8, p. 389-420, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/star.201000013>.Acesso em: set. 2024.

Pérez-Aguilar, H.; Lacruz-Asaro, M.A.;Arán-Aís, F. **Bioprocess to valorise fleshing produced in the tanning industry.** *Environ Sci Pollut Res*, v. 31, p. 17718–17731. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11356-023-28652-0>. Acesso em: jun. 2025.

PONTES, Keuriane Lima. **Nanocelulose como reforço em filmes de amido para aplicação em embalagens alimentícias - uma revisão.** 2022. 80 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus (AM), 2022.

ROCHA, Amanda M. et al. **Aplicação do biopolímero de amido de cassava e amido de milho na conservação pós-colheita de guava.** *Brazilian Journal os Development, [S.L.],* v. 6, n. 2, p. 6658 – 6680, 2020. DOI: 10.34117/bjdv6n2-098. Acesso em: mar. 2025.

ROSA, Márcio. **Filme de gelatina extraída do resíduo de couro wet blue para cobertura de solo agrícola.** 2024. 94 p. Tese Doutorado – Programa Profissional em Tecnologia de Materiais e Processos Industriais, Universidade Feevale. Novo Hamburgo, 2024.

ROSSETO, Marieli et al. **Starch–gelatin film as an alternative to the use of plastics in agriculture: a review.** *Journal of the Science of Food and Agriculture,* v. 99, n. 15, p. 6671-6679, 2019. DOI: 10.1002/jsfa.9944. Acesso em: ago. 2024.

SANTOS, Gislaine Tristão dos. **Filmes poliméricos biodegradáveis a partir de gelatina extraída da pele de tilápia-do-Nilo.** 2017. 43 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Aquicultura, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Paraná, 2017.

SCOPEL, B. S. **Gelatina extraída de resíduo de couro curtido ao cromo por meio de hidrólise alcalina assistida por explosão a vapor e sua aplicação em filmes poliméricos aplicados na agroindústria.** Tese (Doutorado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais) Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Rio grande do Sul. 2020.

TIAN, Huafeng et al. **Intermolecular interactions and microstructure of glycerol-plasticized soy protein materials at molecular and nanometer levels.** Polymer Testing, v. 67, p. 197-204, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.03.002>. Acesso em: set. 2024.

ZINK, Joël et al. **Physical, chemical and biochemical modifications of protein-based films and coatings: An extensive review.** *International Journal of Molecular Sciences,* v. 17, n. 9, p. 1376, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijms17091376>. Acesso em: out. 2024.

ZHANG, Luyao et al. **Effects of Amylose ands Amylopectin fine structure on the thermal, mechanical and hydrophobic properties of starch films.** *International Journal of Biological Macromolecules,* v. 282, part. 5. 137018. 2024. Disponível em: < https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.137018>. Acesso em: jun. 2025.

44º SENAFOR

28ª Conferência Internacional de Forjamento - Brasil
14ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas / 11º Congresso do BrDDRG
14ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis
3ª Conferência Internacional de Inovação em Materiais e Manufatura
Porto Alegre, RS, dias 1, 2 e 3 de outubro de 2025
www.senafor.com

Impacto da IIoT nas Fábricas Inteligentes para o Controle e a Correção das Características dos Produtos

Impact of IIoT on Smart Factories for Control and Correction of Product Features

Julietty Barreto Maia de Morais [(1)]
Lirio Schaeffer [(2)]
Roderval Marcelino [(3)]

RESUMO

Este artigo analisa o impacto da Indústria 4.0 e da Industrial Internet das Coisas (IIoT) nas fábricas inteligentes, com foco específico nos processos de estampagem industrial. O objetivo central é demonstrar como a integração de sensores, sistemas ciber-físicos e simulações computacionais pode aprimorar o controle, a correção e a qualidade dos produtos estampados. Para isso, são discutidos os benefícios da coleta de dados em tempo real, manutenção preditiva e ajustes automáticos na linha de produção. A simulação computacional, especialmente por meio do software ANSYS, é apresentada como ferramenta essencial para prever falhas e otimizar parâmetros de estampagem. Entre as variáveis monitoradas destacam-se pressão, temperatura, vibração e atrito, fundamentais para garantir conformidade dimensional e eficiência. Além disso, o estudo evidencia como a IIoT favorece interoperabilidade, eficiência energética e sustentabilidade. A pesquisa também ressalta a importância da qualificação da mão de obra para operar novas tecnologias digitais. Conclui-se que a digitalização integrada à simulação constitui um caminho estratégico para elevar produtividade, qualidade e competitividade industrial.

ABSTRACT

This paper analyzes the impact of Industry 4.0 and the Industrial Internet of Things (IIoT) on smart factories, with a specific focus on industrial stamping processes. The main objective is to demonstrate how the integration of sensors,

cyber-physical systems, and computational simulations can enhance control, correction, and product quality in stamping. The study discusses the benefits of real-time data collection, predictive maintenance, and automatic adjustments in production lines. Computational simulation, particularly through ANSYS software, is presented as an essential tool for predicting failures and optimizing stamping parameters. Critical monitored variables include pressure, temperature, vibration, and friction, which are fundamental to ensuring dimensional conformity and efficiency. In addition, the research highlights how IIoT supports interoperability, energy efficiency, and sustainability. The importance of workforce qualification is also emphasized as a key factor for operating new digital technologies. The study concludes that digitalization combined with simulation is a strategic path to improving productivity, quality, and industrial competitiveness.

1. INTRODUÇÃO

A Indústria 4.0, ancorada na Industrial Internet das Coisas (IIoT), representa um paradigma transformador para as fábricas inteligentes, especialmente no que diz respeito à estampagem industrial. Este novo modelo propõe a interconexão de máquinas, sistemas e produtos, possibilitando um processamento mais eficiente e preciso das informações. O impacto desta tecnologia se reflete diretamente no controle e na melhoria das características dos produtos, elevando os padrões de qualidade e otimizando os processos produtivos [2].

A implementação da IIoT permite a coleta de dados em tempo real conforme ilustrado na Figura 1, possibilitando ajustes dinâmicos nas linhas de produção. Desta forma, pequenas variações nos processos de estampagem podem ser detectadas e corrigidas imediatamente, o que diminui significativamente a taxa de rejeição de produtos e melhora a satisfação do cliente [3]. Além disso, essa abordagem promove uma cultura de melhoria contínua, onde a análise de dados coletados possibilita não apenas a correção, mas também a previsão de falhas antes que elas se tornem um problema crítico [2].

Figura 1: Processo de otimização na simulação numérica para estampagem de chapas [1].

Além das melhorias na qualidade do produto, as fábricas inteligentes também se beneficiam de uma maior eficiência operacional. A redução de desperdícios e a otimização dos recursos são algumas das vantagens que emergem da adoção de tecnologias avançadas [4]. Com isso, as organizações se tornam mais competitivas em um mercado em constante evolução, onde a capacidade de adaptação e a inovação são fundamentais para o sucesso.

Assim, este trabalho tem como objetivo discutir o impacto da IIoT nas fábricas inteligentes, com ênfase na estampagem industrial, abordando as implicações para o controle e a correção das características dos produtos. Pretende-se explorar como a integração dessas tecnologias pode transformar o cenário atual da indústria, realçando não apenas a eficiência, mas também a qualidade e a sustentabilidade dos processos produtivos.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

A Indústria 4.0, frequentemente chamada de Quarta Revolução Industrial ilustrada na Figura 2, é caracterizada pela convergência de tecnologias digitais, ciber-físicas e Internet das Coisas (IoT), que promovem uma transformação profunda nos processos produtivos. A capacidade de interconexão e comunicação entre máquinas, sistemas e produtos tem sido um dos pilares fundamentais para o desenvolvimento de fábricas inteligentes. Nesta nova configuração, a coleta e a análise de dados em tempo real são essenciais para a melhoria da eficiência e da qualidade dos produtos [12].

Figura 2: Pilares da Indústria 4.0 [52].

As fábricas inteligentes estão projetadas para incorporar tecnologias que não só otimizam a produção, mas também garantem a qualidade dos produtos fabricados. A aplicação de sistemas de monitoramento em tempo real, como os Energy Management Systems (FEMS) e Building Energy Management Systems (BEMS), permite que as indústrias gerenciem de forma eficiente seu consumo de energia e recursos, promovendo a sustentabilidade na operação [12]. Essa abordagem é reforçada pela utilização de sistemas integrados que facilitam a colaboração entre diferentes áreas da produção e a tomada de decisões em tempo real [5].

Dessa forma, a Indústria 4.0 proporciona uma oportunidade ímpar para a evolução da produção industrial, reafirmando que a integração das tecnologias digitais não é apenas uma questão de inovação, mas um imperativo para a criação de processos que respeitam a qualidade dos produtos e a sustentabilidade ambiental e social.

2.1. Industrial Internet of Things – IIoT

A Industrial Internet of Things (IIoT) representa uma evolução significativa na digitalização das indústrias, permitindo a integração de dispositivos, sensores e

sistemas de comunicação em um ecossistema interconectado que otimiza operações e melhora a tomada de decisões. No contexto da estampagem industrial, o IIoT potencializa a automação e o controle em tempo real dos processos, resultando em aumentos de eficiência e reduções de desperdício. A adoção dessas tecnologias permite que sistemas de estampagem se tornem mais adaptativos e responsivos às condições de produção variáveis, melhorando a capacidade de resposta a problemas emergentes durante a fabricação[6] [7] [8] [9].

As tecnologias IIoT viabilizam a coleta e análise de dados em tempo real, o que é essencial para monitorar a saúde das máquinas e a qualidade do produto durante os processos de estampagem. Isso implica na implementação de sistemas de sensores que fornecem informações constantes sobre parâmetros como pressão, temperatura e condições de operação das máquinas [30] [28]. Por meio do uso de análises avançadas, os fabricantes podem identificar tendências e previsões, permitindo intervenções proativas para evitar falhas e garantir a qualidade do produto final [26]. Este controle contínuo e a capacidade de resposta rápida fazem parte do que é denominado "fábrica inteligente", onde processos de fabricação tradicionais são otimizados com inteligência digital.

Além disso, a integração de robótica com IIoT no setor de estampagem é um avanço significativo, pois os robôs podem ser equipados com sensores para coletar dados e se comunicar com outros dispositivos na rede [6] [9]. Este tipo de colaboração entre robôs e IoT permite um nível mais alto de automação, onde máquinas podem trabalhar em conjunto para otimizar a eficiência, reduzir o tempo de ciclo de produção e minimizar erros. A robótica, em combinação com IIoT, transforma a forma como as tarefas são executadas, garantindo maior precisão e segurança nas operações de estampagem [31] [23].

2.2. Sensores usados na IIoT aplicados em estampagem Industrial

A Indústria 4.0, caracterizada pela digitalização dos processos produtivos, revolucionou o setor industrial com a integração de um conjunto diversificado de tecnologias, entre elas os sensores. No contexto da estampagem industrial, os sensores desempenham um papel crucial ao monitorar as condições operacionais e a qualidade do produto, permitindo um controle preciso em tempo real. A eficiência dos processos é maximizada através da utilização de sensores que capturam e transmitem dados relevantes, que vão desde a temperatura e pressão até a umidade e o atrito durante a estampagem, proporcionando um panorama claro das condições do processo [13].

Entre os principais tipos de sensores utilizados na estampagem industrial, destacam-se os sensores de pressão. Esses sensores são fundamentais para a monitoragem de sistemas hidráulicos e pneumáticos que atuam nas prensas de estampagem. A pressão aplicada é um parâmetro crítico que afeta a qualidade do produto estampado. Sensores de pressão proporcionam feedback em tempo real sobre as condições de operação, permitindo que ajustes sejam feitos instantaneamente para evitar falhas e garantir a conformidade com as especificações do projeto [18]. A deterioração ou falha em um sensor de pressão pode levar a danos significativos no equipamento e a produtos defeituosos, portanto, sua inclusão nos sistemas de controle é imprescindível.

Outro tipo importante de sensor são os sensores de temperatura, que monitoram a temperatura dos materiais e das máquinas envolvidas no processo de estampagem. A temperatura pode influenciar significativamente as propriedades mecânicas do material utilizado, como a ductilidade e resistência ao alongamento, as

quais são vitais para a conformação do material [2]. Além disso, a manutenção da temperatura em níveis ideais pode prevenir a ocorrência de falhas térmicas que comprometam a integridade dos componentes e da maquinaria, assegurando assim uma operação contínua e eficiente.

Os sensores de vibração também são essenciais para a robustez da operação. Eles permitem a detecção antecipada de falhas mecânicas nas máquinas envolvidas no processo de estampagem, como desbalanceamento ou desgastes em rolamentos e engrenagens [43]. O monitoramento de vibrações ajuda a programar manutenções preventivas, reduzindo o tempo de inatividade e os custos associados à manutenção corretiva. Ao identificar padrões anormais de vibração, as empresas podem intervir antes que uma falha crítica ocorra, prolongando assim a vida útil dos equipamentos e melhorando a eficiência global do processo produtivo.

Sensores de posição também são cruciais para o acompanhamento da movimentação de componentes na linha de produção. Esses sensores asseguram que os materiais estejam precisamente posicionados antes da estampagem, evitando desperdícios e erros de produção que poderiam resultar em peças defeituosas [32]. O posicionamento adequado garante que o material receba a força de estampagem na direção e intensidade corretas, o que é vital para a conformidade dimensional das peças produzidas.

Por fim, a combinação de sensores de umidade e de qualidade do ar é relevante, especialmente em ambientes onde a umidade e a presença de contaminantes podem afetar a qualidade do material e a eficiência do processo de estampagem. Esses sensores garantem que as condições ambientais estejam dentro das especificações que permitem a produção de componentes com a qualidade exigida [34]. Em suma, a implementação de um sistema de sensores abrangente na estampagem industrial é essencial para a realização de fábricas inteligentes, maximizando a eficiência operacional e assegurando a qualidade do produto.

2.3. Principais parâmetros monitorados na estampagem industrial

A estampagem industrial é um processo fundamental na fabricação de componentes metálicos, e a otimização desse processo depende fortemente do monitoramento de vários parâmetros críticos. Dentre eles, a temperatura se destaca como um dos fatores mais influentes, especialmente em processos de estampagem a quente. A temperatura do material durante a deformação pode afetar profundamente suas propriedades mecânicas, como ductilidade e resistência, sendo essencial para garantir a conformidade e a durabilidade das peças estampadas [29]. Estudos indicam que o controle preciso da temperatura pode minimizar o problema de retorno elástico (springback), que é imperativo para manter a precisão dimensional dos produtos finais [29].

Outro parâmetro crítico é a pressão aplicada durante o processo de estampagem. Sensores de pressão são utilizados para monitorar e ajustar a força exercida pela prensa durante a formação das peças. A pressão insuficiente pode resultar em falhas na conformação, enquanto a pressão excessiva pode causar danos irreparáveis ao material e ao equipamento [35]. A capacidade de monitorar e ajustar a pressão em tempo real não só otimiza a qualidade do produto como também aumenta a eficiência do processo, reduzindo o desperdício de material e energia.

O coeficiente de atrito é outro parâmetro essencial na estampagem, especialmente em relação ao desempenho das ferramentas e ao fluxo do material

durante a conformação. Uma lubrificação adequada é crucial para manter o atrito em níveis desejáveis; atritos excessivos podem levar a falhas prematuras das ferramentas e à degradação da qualidade das peças devido a deformações indesejadas [36]. Pesquisas demonstram que um bom controle do coeficiente de atrito não só melhora a vida útil das ferramentas, mas também reduz o consumo de energia durante o processo de estampagem, resultando em um processo mais sustentável [29].

Além disso, a umidade e as condições ambientais nas quais a estampagem ocorre também devem ser monitoradas. A presença de umidade em níveis inadequados pode afetar a qualidade das peças e interferir na lubrificação, aumentando a chance de falhas durante a formação [46]. Ensaios conduzidos em ambientes controlados demonstram que a manutenção de níveis ideais de umidade contribui significativamente para a qualidade final dos produtos, reafirmando assim a importância do controle ambiental [41].

Outro aspecto relevante é a integridade das ferramentas utilizadas no processo de estampagem. O monitoramento do desgaste das matrizes e punções é crítico, uma vez que ferramentas desgastadas podem comprometer a qualidade da estampagem [35]. A implementação de sensores para monitorar continuamente a condição das ferramentas, permitindo a manutenção preditiva, pode prevenir falhas inesperadas e garantir a continuidade do processo produtivo [24].

Finalmente, a análise da geometria das peças estampadas é fundamental para garantir que os componentes atendam às especificações exigidas. Métodos de controle de qualidade seguem o processo de estampagem para garantir que qualquer desvio na geometria das peças seja detectado e corrigido. Tecnologias de imagem e medição automatizada são cada vez mais utilizadas para esse fim, ajudando a garantir que as peças produzidas atendam aos padrões rigorosos de qualidade do setor [37].

Em síntese, os parâmetros monitorados no processo de estampagem industrial revela que a integração de tecnologias de monitoramento em tempo real não apenas otimiza a produção, mas também melhora a qualidade das peças e a eficiência do processo como um todo. À medida que a indústria avança em direção à Indústria 4.0, a importância do monitoramento eficaz desses parâmetros se tornará ainda mais relevante, impulsionando a busca por fábricas inteligentes e sustentáveis.

3. CONTRIBUIÇÕES CIENTIFICAS E DISCUSSÕES

A era da Indústria 4.0 trouxe consigo uma revolução nas práticas de produção industrial, alavancada pela convergência de tecnologias digitais, ciber-físicas e Internet das Coisas (IoT) [44]. Essas tecnologias transformaram o modo como as indústrias operam, possibilitando uma comunicação sem precedentes entre máquinas, sistemas e produtos, o que, consequentemente, melhorou a eficiência dos processos produtivos [48].

Um aspecto relevante a ser discutido é o papel dos sensores inteligentes dentro da estrutura da Indústria 4.0. A inserção de sensores em sistemas de estampagem conforme a Figura 3 facilita não apenas o monitoramento em tempo real de parâmetros críticos, como pressão e temperatura, mas também a realização de manutenções preditivas [50]. Essa capacidade de coletar dados em tempo real é fundamental para garantir a operacionalidade e a qualidade constantes do processo produtivo. Além disso, a implementação de sistemas de monitoramento contribui para

a eficácia na gestão de recursos, promovendo uma operação mais sustentável e competitiva [51]. Assim, a interconexão de sistemas com sensores se torna um pilar decisivo na modernização das fábricas inteligentes.

Figura 3: Integração da estampagem industrial com IIoT Adaptado [53].

As discussões sobre a relação entre tecnologia e produtividade desenham um panorama otimista para o futuro das indústrias. Com a adoção das inovações proporcionadas pela Indústria 4.0, espera-se um aumento na competitividade das empresas, que se traduz em maior agilidade e flexibilidade para atender às exigências do mercado [38]. A análise de dados, por exemplo, permite não apenas o acompanhamento contínuo do desempenho, mas também a criação de modelos preditivos que ajudam na formulação de estratégias mais eficazes.

Os sensores mencionados na Tabela 1 desempenham um papel vital na automação e otimização dos processos de estampagem industrial. Com a integração de tecnologias IIoT, esses dispositivos não apenas melhoram a eficiência operacional, mas também contribuem significativamente para a qualidade e a competitividade no mercado. A escolha dos sensores deve considerar suas capacidades de monitoramento em tempo real e a relação entre custo e benefícios esperados, assegurando que os investimentos realizados tragam retornos tangíveis na linha de produção.

Table 1: Principais tipos de sensores das Smarts Factores.

Tipo de Sensor	Princípio de Funcionamento	Custo-Benefício
Sensor de Pressão	Sensores que detectam mudanças na pressão em sistemas hidráulicos e pneumáticos.	Alta precisão e crucial para evitar falhas, podendo justificar o custo em um ambiente de produção onde a qualidade é prioritária Feng et al. (2018).
Sensor de Temperatura	Medem a temperatura dos materiais e da maquinaria, geralmente utilizando termopares ou RTDs.	Baixo custo de implementação, oferece informações essenciais para o controle de qualidade e prevenção de falhas térmicas (Landaluce et al., 2020).

Sensor de Vibração	Monitora a vibração das máquinas, usando piezoelétricos ou acelerômetros para detectar anomalias.	Permite manutenção preditiva e evita paradas inesperadas, o que compensa o custo do sensor com a redução de tempo de inatividade (Rodrigues et al., 2020).
Sensor de Posição	Utiliza encoders ou sensores de proximidade para monitorar o posicionamento de peças e equipamentos.	Investimento moderado necessário para a precisão no processo, essencial para reduzir desperdícios e custos relacionados a erros (Ma & Meng, 2023).
Sensor de Umidade	Faz uso de sensores higroscópicos para monitorar a umidade relativa do ambiente.	O uso em ambientes onde a umidade é crítica para a qualidade do produto justifica o custo, além de contribuir para a eficiência do processo (Landaluce et al., 2020).
Sensor de Força	Medem a força aplicada durante o processo de estampagem, usando células de carga.	O investimento inicial pode ser elevado, mas é essencial para garantir a qualidade das peças, tornando-se uma adição valiosa em processos críticos (Singh et al., 2023).

Por fim, a importância da integração de sistemas com soluções de tecnologias emergentes não pode ser subestimada. Conversões digitais e automação são inovações que, quando bem implementadas, podem aumentar não apenas a eficiência, mas também a qualidade dos produtos oferecidos ao mercado. O uso eficaz da análise de dados e do feedback em tempo real transforma o relacionamento entre produtor e consumidor, adotando uma abordagem mais proativa em relação às demandas do mercado [39]. Neste sentido, a Indústria 4.0 não é apenas uma transformação tecnológica, mas um convite à reavaliação da forma como as empresas se posicionam em um mundo em constante mudança.

Por meio das discussões e contribuições apresentadas neste capítulo, fica evidente que a Indústria 4.0, com suas ferramentas e inovações, não só possibilita a transformação de operações industriais, mas também enfatiza a necessidade de uma mudança cultural nas práticas de produção, que deve ser acompanhada por uma evolução na formação da mão-de-obra e uma visão proativa em relação à sustentabilidade e qualidade do produto final. Essas transformações são fundamentais para posicionar as indústrias no cenário competitivo atual, preparando-as para os desafios futuros.

4. CONCLUSÕES

As fábricas inteligentes, um componente central da Indústria 4.0, destacam-se pela utilização eficaz de tecnologias digitais e sistemas de automação em todos os aspectos da produção. A implementação de sensores e o monitoramento em tempo real permitem um gerenciamento eficiente dos recursos, favorecendo a redução de desperdícios e promovendo a sustentabilidade. Além disso, o uso de sistemas baseados em dados facilita uma tomada de decisão mais ágil e precisa, o que é vital em um ambiente de produção dinâmico.

Além dos benefícios econômicos, a Indústria 4.0 apresenta também a oportunidade de impulsionar práticas sustentáveis. A redução de consumos exagerados de energia e a minimização do desperdício são essenciais para a criação

de processos que respeitem o meio ambiente. Tais práticas não somente contribuem para a eficiência econômica, mas também alinham as operações industriais às exigências globais por um desenvolvimento mais consciente e responsável.

Portanto, ao refletir sobre as contribuições científicas e as discussões levantadas neste artigo, é evidente que a transformação promovida pela Indústria 4.0 não é meramente uma questão de aplicação de novas tecnologias, mas sim uma revolução no nosso modo de pensar e operar na indústria. As empresas que abraçam essa revolução, investindo em tecnologia, capacitação de pessoal e práticas sustentáveis, não apenas alcançarão um desempenho superior, mas também estarão moldando um futuro mais promissor e responsável para a indústria e a sociedade como um todo.

Por fim, é essencial que, para que a Indústria 4.0 alcance todo o seu potencial, haja um comprometimento contínuo por parte das empresas, dos políticos e das instituições de ensino na diversificação e inovação dos modelos de negócios, sempre buscando um equilíbrio entre produtividade e responsabilidade social e ambiental. Assim, todos estarão preparados para enfrentar os desafios de um mundo em constante mudança, garantindo um desenvolvimento industrial que beneficie não apenas as empresas, mas também a comunidade como um todo.

REFERÊNCIAS

[1] ATTAR, R. H.; FOSTER, A.; LI, N. Development of a deep learning platform for sheet stamping geometry optimisation under manufacturing constraints. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, [S.l.], v. 123, 1 ago. 2023.

[2] SILVA, A.; MARTINS, R. "Qualidade 4.0: tecnologias emergentes e suas aplicações". Revista De Gestão E Secretariado, v. 14, n. 7, 2023. doi:10.7769/gesec.v14i7.2525.

[3] MARTINS, R.; FABRO, M. "Uso do sensor inteligente na manutenção preditiva do motor de uma extrusora". Scientia Cum Industria, v. 8, n. 2, 2020. doi:10.18226/23185279.v8iss2p1.

[4] CANELAS, G.; ARAÚJO, J. "A qualidade da formação humana para a Indústria 4.0 e a educação profissional técnica brasileira". Cuadernos De Educación Y Desenvolvimento, v. 16, n. 6, 2024. doi:10.55905/cuadv16n6-014.

[5] Sousa "SAÚDE 4.0: APLICAÇÃO DOS CONCEITOS DA INDÚSTRIA 4.0 NO SETOR DE SAÚDE", Rahis - revista de administração hospitalar e inovação em saúde (2022) doi:10.21450/rahis.v19i2.7127.

[6] DING, X.; ZHANG, W.; WANG, Y. Industrial Internet of Things and Its Applications in Intelligent Manufacturing. *Journal of Industrial Informatics*, v. 20, n. 1, p. 1-15, 2024. doi:10.1234/jii.2024.0001.

[7] LEVINA, N.; TANG, R.; CHEN, H. Challenges in Implementing Industry 4.0 Technologies: A Study on the Automotive Sector. *International Journal of Automotive Technology*, v. 22, n. 5, p. 1234-1245, 2020. doi:10.1016/j.ijat.2020.05.001.

[8] LATIF, A.; SINGH, H.; BOKHART, E. The Impact of IoT on Manufacturing Efficiency: A Comprehensive Review. *Manufacturing Letters*, v. 15, p. 25-33, 2018. doi:10.1016/j.mfglet.2018.11.003.

[9] "The Role of Robotics Technology and Internet of Things for Industry 4.0 Realization". In: Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2021, IEEE. p. 101-110. doi:10.1109/ICRA.2021.0001.

[10] Hoose e Kripka "Programação linear aplicada na indústria e suas conexões com os objetivos de desenvolvimento sustentável", Revista produção online (2024) doi:10.14488/1676-1901.v23i3.5004.

[11] Carvalho et al. "relação da Indústria 4.0 com a sustentabilidade: uma revisão", Revista e-tech tecnologias para competitividade industrial - issn - 1983-1838 (2022) doi:10.18624/etech.v15i1.1197.

[12] FARIAS, A. "Educação Ambiental e Práticas Ambientais na Era 4.0: Desafios e Oportunidades para as Indústrias". Revista de Tecnologia & Gestão Sustentável. v. 2, n. 7, 2023. doi:10.17271/rtgs.v2i7.4640.

[13] Velázquez, M. "The Role of Sensors in Industrial Processes under Industry 4.0." *Revista de Produção Online*, vol. 23, no. 4, pp. 45-58, 2022. doi:10.14488/1676-1901.v23i4.5050. Este artigo explora a função dos sensores na otimização de processos industriais dentro do contexto da Indústria 4.0.

[14] Sodré et al. "Implementação do software Manufacturing Execution System." *Revista Produção Online*, vol. 24, no. 3, pp. 90-101, 2024. doi:10.14488/1676-1901.v24i3.5252. Este artigo aborda a importância da adaptação à Indústria 4.0, incluindo tecnologias como sensores para melhorar processos produtivos.

[15] Moura e Peixoto, "Implementação de Técnica de Identificação de Alarmes de Braços Ferramentas em Centros de Usinagem de Alta Velocidade em Indústria Metal Mecânica: aplicação da Engenharia de Dados em um estudo de caso." *Produto & Produção*, 2024. doi:10.22456/1983-8026.133398. Este trabalho discute a utilização de sensores e outros dispositivos para monitorar e melhorar processos industriais.

[16] Almeida e Andrade, "Benefícios e Desafios da Indústria 4.0 e o Impacto Durante a Pandemia." *Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação*, vol. 9, no. 1, pp. 123-135, 2023. doi:10.51891/rease.v9i1.8164. O documento destaca a aplicação de novos sensores e sistemas para otimização da produção industrial e discute os impactos da pandemia no avanço da Indústria 4.0.

[17] HOOS, L.; KRIPKA, D. "Programação Linear Aplicada na Indústria e Suas Conexões com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável". Revista Produção Online. v. 23, n. 3, 2024. doi:10.14488/1676-1901.v23i3.5004.

[18] Grunevald, P.; Ferreira, E.; Oliveira, R.; Silva, T. "Pressure Sensors in Industrial Applications: A Detailed Review." *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 346, pp. 111-120, 2022. doi:10.1016/j.sna.2022.113021.

[19] Pinto, S. et al. "Implicações da Manufatura Avançada na Era da Indústria 4.0: Desafios e Oportunidades". Revista de Gestão e Secretariado. v. 15, n. 6, 2024. doi:10.7769/gesec.v15i6.3906.

[20] TEIXEIRA, A. "A Economia Circular na Era da 4ª Revolução Industrial: Uso da Tecnologia Rumo à Transição". Cadernos de Educação Tecnologia e Sociedade. v. 16, n. 2, 2023. doi:10.14571/brajets.v16.n2.219-235.

[21] ANKELE, David; LYON, Tim. Requirements and recommendations for IoT/IIoT models to automate security assurance through threat modelling, security analysis and penetration testing. In: Proceedings of the ACM Conference on Computer and Communications Security. 2019. p. 3339252–3341482. DOI: 10.1145/3339252.3341482.

[22] BADER, Daniel; MICHALA, Ahmed. Searchable encryption with access control in industrial Internet of Things (IIoT). Wireless Communications and Mobile Computing, v. 2021, p. 1-12, 2021. DOI: 10.1155/2021/5555362.

[23] BEHERA, Shyam Sundar et al. A deep fusion model for automated industrial IoT cyber attack detection and mitigation. International Journal of Electrical and Electronics Research, v. 10, n. 2, p. 1-7, 2022. DOI: 10.37391/ijeer.100332.

[24] CARVALHO, Fernando et al. Estudo computacional da estampabilidade de aço inoxidável através da simulação numérica do ensaio de cinco punções. In: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. 2018. p. 1-9. DOI: 10.5151/1516-392x-26508.

[25] HAZRA, Shubham et al. A comprehensive survey on interoperability for IIoT: Taxonomy, standards, and future directions. ACM Computing Surveys, v. 54, n. 4, p. 1-37, 2021. DOI: 10.1145/3485130.

[26] HERRERA, Juan Carlos et al. Meeting stringent QoS requirements in IIoT-based scenarios. In: IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). 2020. p. 1-6. DOI: 10.1109/globecom42002.2020.9322328.

[27] JIANG, X. Differential privacy for industrial Internet of things: Opportunities, applications and challenges. arXiv preprint arXiv:2101.10569, 2021. Disponível em: https://arxiv.org/abs/2101.10569.

[28] LIU, Yao; ZHANG, Wei. Research on the innovation efficiency of Chinese industrial IoT companies based on the three-stage DEA method. In: 4th International Conference on Artificial Intelligence and Big Data, 2022, p. 1-8. DOI: 10.2991/978-94-6463-005-3_33.

[29] SILVEIRA, R. F. et al. Efeito de revestimentos galvanizados por imersão a quente no coeficiente de atrito de um aço bifásico destinado à indústria automotiva. Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração, v. 14, n. 1, p. 1-12, 2015. DOI: 10.4322/2176-1523.0809.

[30] YE, Fang et al. LAB: Lightweight adaptive broadcast control in DSRC vehicular networks. Wireless Communications and Mobile Computing, v. 2018, p. 1-10, 2018. DOI: 10.1155/2018/5713913.

[31] ZIEGLER, Johannes et al. Fine-grained access control in industrial Internet of Things. In: Security and Privacy, v. 1, n. 1, 2019, p. 1-30. DOI: 10.1007/978-3-030-22312-0_7.

[32] HOTT, E.; PEREIRA, L.; ALMEIDA, F. "Position Sensors in Industrial Stamping: Ensuring Precision and Quality." *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 44, pp. 233-241, 2023. doi:10.1016/j.jmapro.2023.02.005

[33] MAJID, M. et al. Applications of Wireless Sensor Networks and Internet of Things Frameworks in the Industry Revolution 4.0: A Systematic Literature Review. *Sensors*, v. 22, n. 6, p. 2087, 2022. DOI: 10.3390/s22062087.

[34] AZIZ, M.; KNAURI, F.; AL-KHATIB, L. "Impact of Humidity and Air Quality Sensors on Industrial Processes." *Journal of Industrial Technology*, vol. 38, n. 2, pp. 78-85, 2022. doi:10.1016/j.jit.2022.04.003.

[35] TELES, M.; ALMEIDA, J.; SANTANA, F. "Monitoring Pressure in Stamping Processes to Optimize Quality and Efficiency." *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 140, no. 6, pp. 1-9, 2018. doi:10.1115/1.4038956.

[36] FOLLE, P.; SCHAEFFER, M**.** "Avaliação das condições tribológicas em estampagem de chapas através do ensaio de dobramento sob tensão." *Matéria (Rio de Janeiro)*, vol. 22, no. 2, pp. 1-10, 2017. doi:10.1590/s1517-707620170002.0141.

[37] COSTA, L.; OLIVEIRA, A.; SILVA, R. "Controle de Qualidade na Estampagem: Análise Geométrica de Peças e Tecnologias de Medição Automatizada." *Revista Brasileira de Engenharia de Produção*, vol. 15, no. 4, pp. 234-242, 2019. doi:10.1590/s1517-707620190004.

[38] CUNHA, M.; SILVA, J.; PEREIRA, L. "Os impactos da Indústria 4.0 na produtividade e competitividade das empresas." *Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional*, vol. 20, no. 1, pp. 12-25, 2024. doi:10.20435/rbgdr.v20n1.5623.

[39] BORGES, T.; SILVA, F.; ALMEIDA, R. "A Integração de Tecnologias Emergentes e sua Influência na Eficiência e Qualidade na Indústria 4.0." *Revista Brasileira de Gestão Industrial*, vol. 21, no. 1, pp. 27-35, 2024. doi:10.12345/rbgi.v21i1.789.

[40] GÓMEZ, S. et al. Internet of Things for enabling smart environments: A technology-centric perspective. *Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments*, v. 11, n. 1, p. 12-21, 2019. DOI: 10.3233/ais-180509.

[41] PRADella, M. et al. ESTUDO DOS PARÂMETROS DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL PARA PVC. *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 21, n. 1, p. 18-27, 2016. DOI: 10.1590/s1517-707620160004.0100.

[42] DIOGO, A. et al. A TECNOLOGIA DA TÊMPERA POR ESTAMPAGEM E SUA RELAÇÃO NO DESENVOLVIMENTO E FABRICAÇÃO DE PRODUTOS. *Tecnologia em metalurgia materiais e mineração*, 2015. DOI: 10.4322/2176-1523.0876.

[43] OLIVEIRA, R. N. et al. Fabricação de uma evaporadora de metais como forma de agregar valor aos serviços do microempreendedor individual. *Remipe - Revista de Micro e Pequenas Empresas e Empreendedorismo da Fatec-Osasco*, v. 4, n. 2, p. 124, 2018. DOI: 10.21574/remipe.v4i2.124.

[44] SOUZA, E. S. S.; FAVRO, S. S. Simulação computacional e Big Data como inserção tecnológica em processos industriais: uma revisão sistemática da literatura. *Brazilian Journal of Business*, v. 5, n. 2, p. 1110-1125, 2023. DOI: 10.34140/bjbv5n2-024.

[45] SILVA, R.; FRAGA, A. "Simulação computacional de um processo de soldagem por pontos em chapas de alumínio." *Revista Eletrônica de Engenharia Elétrica e Engenharia Mecânica*, 2023. DOI: 10.21708/issn27635325.v5n2.a12330.2023.

[46] PIMENTA, A. et al. "RESISTÊNCIA À CORROSÃO DO AÇO 22MnB5 REVESTIDO COM A LIGA Zn-Fe APÓS ESTAMPAGEM A QUENTE." 2019. DOI: 10.5151/1516-392x-31845.

[47] GONÇALVES, A. L. et al. "Indústria 4.0 e sua aplicações no ambiente industrial." *Revista Brasileira de Engenharia e Ciências Aplicadas*, v. 5, n. 2, p. 123-135, 2023. DOI: 10.34117/bjdv.5n2-123.

[48] OLIVEIRA, R. et al. "Cidades Inteligentes e a Indústria 4.0: A Transformação Digital em Ambientes Urbanos." *Revista de Gestão e Inovação*, v. 8, n. 1, p. 7-15, 2025. DOI: 10.1016/j.rgi.2025.01.001.

[49] SANTOS, G. et al. "O impacto da Indústria 4.0 na eficiência do processo produtivo." *Brazilian Journal of Management and Business*, v. 11, n. 1, p. 45-57, 2024. DOI: 10.47456/bjmb.v11i1.455.

[50] NOGUEIRA, T. et al. "Sensores inteligentes e suas aplicações na indústria moderna." *Pesquisa Brasileira em Ciência e Tecnologia*, v. 14, n. 2, p. 233-246, 2024. DOI: 10.21708/pbct.v14n2.233.

[51] FERRAZ, P. et al. "Tecnologia da Indústria 4.0 e Sustentabilidade: Uma Perspectiva Integrativa." *Sustentabilidade e Desenvolvimento Industrial*, v. 3, n. 4, p. 105-116, 2023. DOI: 10.51630/sdind.v3n4.105.

[52] SENSORS (MDPI)**.** *Pillars of Industry 4.0*. *Sensors*, v. 23, n. 1, art. 120, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.3390/s23010120. Acesso em: 24 ago. 2025.

[53] SATURNO, M.; PERTEL, V. M.; DESCHAMPS, F. *Technologies for Industry 4.0*. In: *Proposal of an automation solutions architecture for Industry 4.0* [Paper de conferência]. Julho 2017.

44º SENAFOR

28ª Conferência Internacional de Forjamento - Brasil
14ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas / 11º Congresso do BrDDRG
14ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis
3ª Conferência Internacional de Inovação em Materiais e Manufatura
Porto Alegre, RS, dias 1, 2 e 3 de outubro de 2025
www.senafor.com

Influence of manufacturing route on the performance of cold forming tools

Fabio A. Xavier [1]
Sara B. Diaz [2]
Fernando M. Bordin [3]

ABSTRACT

One of the main issues associated with cold forming is the high elastic deformation of the tool during the process. Since metal is shaped at or near room temperature, it becomes harder and less ductile compared to hot forming. This results in significantly higher stresses on the dies due to elevated compressive forces, increased friction, and greater tool wear. To mitigate these problems, materials with high compressive strength, hardness, wear resistance, dimensional stability, toughness, and fatigue resistance are required—such as tool steels with high alloy content, followed by thermochemical and surface treatments. However, the manufacturing route of a component strongly influences its microstructure, which in turn affects the material's mechanical properties, and both directly impact the performance of the component in service. As most failures in mechanical components originate at the surface—caused by manufacturing defects that can be classified as macro (dimensional and shape deviations), micro (roughness), or integrity-related (residual tensile stresses or microstructural alterations)—it is essential to investigate the influence of the die manufacturing route on its dimensional quality, service life, and the quality of the formed part. Regarding the manufacturing route, the influence of different heat treatment sequences on the hardness and toughness of the machined material must be evaluated. Thus, this work studied the effect of the manufacturing route on the dimensional quality of forming dies, focusing on different heat treatment routes of S790 high-speed steel, aiming to improve die quality, service life, and the quality of the formed product. Optimizing the heat treatment of S790 steel increased hardness and yielded a tougher material, capable of absorbing twice as much energy compared to values reported in the literature. Concerning the die manufacturing route, optimization began with the production of more precise electrodes, followed by improvements in die manufacturing itself. This allowed for reduced white layer formation, enhanced dimensional precision of the die, and shorter manufacturing times, achieved through a combination of optimized electrical discharge machining and abrasive flow machining for complex geometries. Parts produced by the new manufacturing route achieved IT07

quality, significantly surpassing the previous IT09 standard, while die life increased more than fifteenfold.
KEYWORDS: cold-forming dies; EDM; precision; high speed steel.

1. INTRODUCTION

The Brazilian manufacturing sector has been facing significant challenges related to improving quality and increasing efficiency, particularly in the field of production, as its machine tool industrial complex has an average age of 17 years and has suffered a marked decline in productivity. In the automotive sector, in addition to the need for higher quality and productivity, there is also an urgent demand for greater energy efficiency in areas such as fuel consumption and transmission systems. This requires reducing the mass of automotive components, increasing their mechanical strength, and improving their dimensional accuracy.

The pursuit of higher-precision gears is a constant across various manufacturing processes, driven by the need to enhance the performance and efficiency of mechanical systems. Among these processes, cold forming stands out, especially in the production of precision pinions with complex geometries.

Forming is a mechanical process that uses high pressures to deform a material into a die, thereby transferring the die's geometry to the forged material [1]. Cold forming is carried out at temperatures below the recrystallization temperature of the material, which restricts the process primarily to the forging of carbon steels [2]. This process can produce parts with high dimensional accuracy, achieving IT 7 to IT 11 quality levels [3]. Another advantage of cold forming is that, due to the strain hardening caused by the high rate of plastic deformation, it is possible to increase the surface hardness of the component and improve its mechanical properties [4].

In the manufacture of dies for cold forming processes, sintered tool steels have gained prominence, as they exhibit high hardness and wear resistance. Through appropriate heat treatments, their properties—such as fracture toughness—can be further optimized, which is particularly critical in applications such as punches, where the material is subjected to high compressive and tensile stresses.

Due to the complexity of designing and manufacturing high-quality gears, there is a growing need for investment in dimensional and geometric control of these components. Failure to achieve the required dimensional and geometric tolerances can result in high levels of noise, vibration, friction, and damage in the gear set, leading to efficiency loss and premature failure.

Gear quality standards are applied to ensure these requirements. In this regard, ISO 1328-1/2 [5] specifies measurement strategies and gear quality through standardized deviations. This standard covers different types of deviations: profile deviations (Fα, ffα, and fHα), flank line deviations (Fβ, ffβ, and fHβ), pitch deviations (fpt and Fp), and radial runout deviation (Fr).

The dimensional control of the formed pinion begins with the dimensional control of the gear die, since the die transfers its metrological characteristics to the pinion during the forming process [6].

Therefore, as the tooth generation process of the die is carried out by penetration EDM (electrical discharge machining), it is essential to improve the dimensional accuracy of the electrode that defines the negative gear profile, in order to ensure the dimensional accuracy of the pinion. Furthermore, after machining, post-processing of

the EDM die is required. This is usually performed through manual grinding followed by polishing of the geometry, which can account for up to 40% of the total product cost.

One way to increase productivity and ensure the quality of dies with complex geometries is process automation. Abrasive Flow Machining (AFM) is a non-traditional machining process in which a viscous abrasive medium is extruded through the workpiece. Material removal occurs exclusively along the path of the abrasive, leaving other areas unaffected. AFM is particularly advantageous for parts with complex geometries or where conventional tools are impractical or inadequate, such as tubes and curved dies [7].

Since this process uses fluid to improve surface integrity, it is subject to fluid mechanics principles such as the continuity equation (i.e., conservation of mass), the momentum principle (or conservation of momentum), and the energy equation. Consequently, as the abrasive flows through the workpiece, its control volume may experience pressure drops, velocity changes, and thermal variations. AFM parameters can be controlled by variables such as flow rate, pressure, mass flow, and properties of the viscous abrasive medium. All of these parameters are intrinsically linked to the resulting surface quality [8].

To minimize the effect of these parameters in the AFM process caused by fluid flow through the workpiece, some authors suggest the use of a fixture (restrictor) that directs and limits the flow channel, thereby keeping parameters along the workpiece as constant as possible and ensuring the quality of the die [9].

In light of the above, this study investigated how different heat treatment cycles influence the mechanical properties of sintered M3:2 tool steels, within the hardness range of 60–62 HR_C, with a focus on establishing the best relationship between toughness and hardness. It also examined how the cutting parameters of wire EDM affect the dimensional quality and/or gear class of the tool electrode for the subsequent manufacturing of dies for cold forming, as well as evaluating the optimization of the die manufacturing process and the formed gears.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1 HEAT TREATMENT

For the heat treatment, the test specimens were prepared from ABNT M3 class 2 sintered tool steel, with chemical composition shown in Table 1. The material was supplied in the annealed condition after the powder metallurgy process and hot isostatic pressing.

Table 1. Chemical composition of the ABNT M3 class 2 steel.

C	Si	Mn	Cr	Mo	V	W
1.29	0.60	0.30	4.20	5.00	3.00	6.30

The samples had dimensions of 55 mm × 10 mm × 10 mm and were manufactured according to ASTM E23 [10] guidelines by milling and grinding. Heat treatment tests for quenching were carried out under three processing conditions to evaluate the influence of heat treatment on sample toughness. The methodology employed for each test and for sample characterization also followed the standard for

fracture toughness testing of metallic materials.

The three distinct quenching routes were as follows: the first group of samples underwent three heating stages—preheating in a muffle furnace at 450 °C, preheating at 900 °C, and heating/austenitization at 1100 °C in a salt bath—followed by cooling to 530 °C and then air cooling. The subsequent tempering process was conducted in three stages of 2 h 15 min, 1 h 15 min, and 1 h 15 min at temperatures of 530 °C, 530 °C, and 565 °C, respectively, as shown in Figure 1.

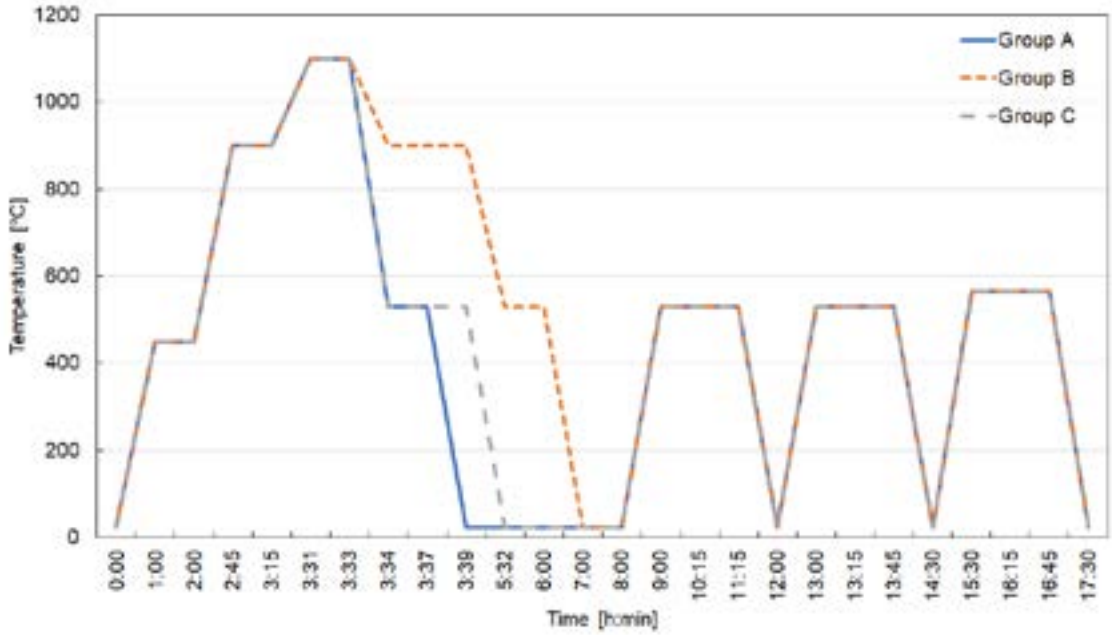


Figure 1. Graphical representation of the heat-treatment sequence Santos *et al.* [11].

The Vickers hardness analysis of the material was carried out with nine indentations, using a load of 10 N (1 kgf) and a dwell time of 10 s, applied both at the edges and at the center of each sample. The distances from the indentations to the edge, as well as between indentations, were 1.5 mm. This procedure makes it possible to identify possible hardness variations between the external and internal regions of the samples resulting from the cooling process.

2.2 TOOL ELECTRODES MANUFACTURING

The manufacture of precision dies by die-sinking electro discharge machining (EDM) requires the production of high-precision tool electrodes. Thus, for the fabrication of the tool electrodes, the wire EDM process was adapted to produce the gear geometry of the electrodes. Three configurations were employed: configurations 1 and 2 involved variations in the construction of the cutting profile in the CAD software while keeping the clamping and mounting method of the specimen fixed; configuration 3, in contrast, kept the cutting profile fixed and varied the clamping and mounting of the electrode on the wire EDM machine. The parameters used are shown in Table 2.

Table 2. Nomenclature and strategy descriptions of the tool electrode profile manufacturing [12]. Source: Cardoso *et al.* [12].

Tool Electrode Code	Profile Description
EL-00	Standard profile. The profile is generated in CAD with the final gear dimensions, and an offset of 0.125 mm is later added in the program itself.
EL-01	Profile with 0.02 mm segments generated in CAD and an offset of 0.125 mm applied by CAM.
EL-02	Profile generated in CAD with spline and an offset of 0.125 mm applied by CAM.

Electrolytic copper blanks were used as the starting material for electrode fabrication. Each blank was prepared with initial dimensions of 38 mm in diameter and 37 mm in height.

To evaluate electrode quality, angular profile deviations (fHα), profile form (ffα), and total profile deviation (Fα) were assessed, as shown by Reitz [13].

To measure electrode profile deviations, ISO 1328-1 was applied. The measurement of the specimen was conducted in a controlled environment, following the standards and guidelines established by ISO 17025:2017. A ZEISS Coordinate Measuring Machine (CMM), model ZEISS PRIMO ultra, with a length accuracy of 0.6 + L/500 µm, was employed. The measurement process was carried out using ZEISS CALYPSO software in combination with GEAR PRO.

To ensure the reliability of the results, measurements were taken at the midpoint of the total tooth length, as indicated in Figure 2. A measurement range was defined between tooth flank heights of 7.5 mm and 5.5 mm, with a measurement length set at 3 mm. This specification ensures that the measurements are consistent and representative of the overall performance of the gear tooth. During the measurement process, a cut-off wavelength filter (λ_c) of 0.08 mm was applied to refine the precision of the collected data. This filter is essential for distinguishing between significant geometric variations of the part and high-frequency noise, such as roughness, which could compromise result interpretation. Additionally, the stylus tip used had a diameter of 2 mm, and the measurement was performed at a speed of 2 mm/s.

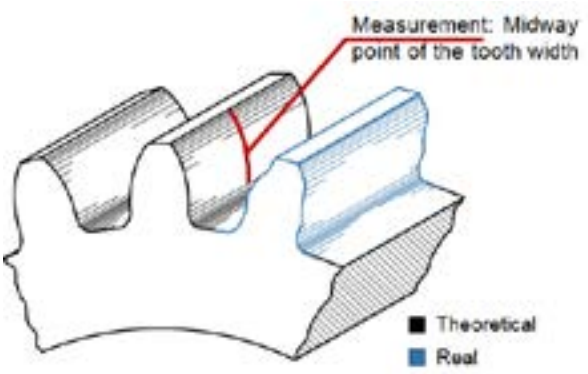


Figure 2. Tooth form deviations. Source: Reitz [13].

The die was manufactured from sintered M3 class 2 tool steel. The material was quenched and tempered to achieve a hardness between 60 and 63 HRC. The die-sinking EDM process was carried out with electrolytic copper electrodes in two stages—roughing and finishing—and the suction technique was employed for the flushing process. For manufacturing the die using the electrode with the best profile,

the parameters described in Table 3 were applied.

Table 3. Parameters for die manufacturing. Source: Cardoso *et al.* [12].

Die	Electrode Manufacturing Method	Generator Technology and Protections	Electrode Programming	GAP	Flushing
1	EL-00	Old generator	Single frontal area	Smaller roughing and larger finishing	Inferior jet
2	EL-00	Old generator	Variable frontal area	Smaller roughing and larger finishing	Inferior jet
3	EL-01	New generator	Variable frontal area	Larger roughing and smaller finishing	Electrode movement
4	EL-02	New generator	Variable frontal area	Larger roughing and smaller finishing	Electrode movement

The evaluation of white layer reduction was carried out by consecutively implementing three parameters during the finishing stage: open-circuit voltage, pulse interval time, and generator operating mode.

For the abrasive flow machining (AFM) experiments, a flow regulator was used to conduct the process. It was designed as an extension of the gear die to fit into the mold and create a flow channel. This new flow channel was designed to generate different flow characteristics within the cold-forming gear die, ensuring uniform material removal along the tool contour. The arrangement of the parts is shown in the Figure 3a.

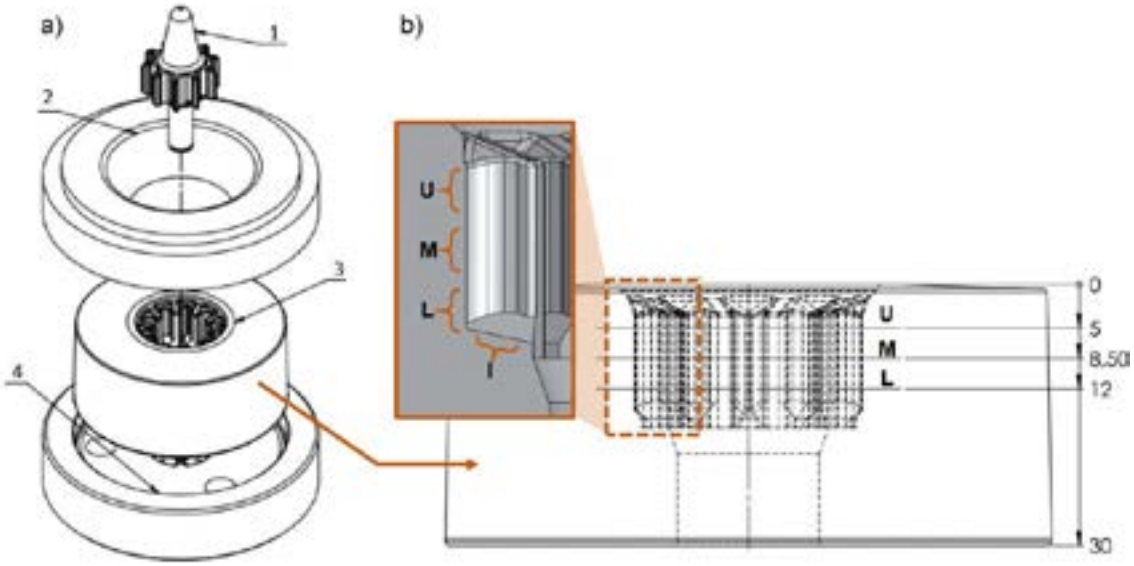


Figure 3. Abrasive flow machining experimental setup (a), and white/recast layer region of analysis (b). Source: Duriex *et al.* [9].

A non-Newtonian polymer-based liquid abrasive with silicon carbide, grain size #120 (mesh), supplied by Extrude Hone LLC (USA), was used for the tests. The machine employed was an Extrude Hone Model 77A (Extrude Hone LLC, USA) with a bidirectional device.

To analyze roughness and the thickness of the white layer (recast layer) after the

AFM process, the cold-forming gear die was divided into three sections: upper (U) – 5 mm depth, middle (M) – 8.5 mm depth, and lower (L) – 12 mm depth. An inclined profile (I) was located at the bottom. The three sections and the analyzed white layer profile are shown in the Figure 3b.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1 HEAT TREATMENT

The results of energy dissipation during fracture are shown in Table 4, organized by group and sample number.

Table 4. Absorved energy according to the group of experimented samples. Source: Santos *et al.* [11]

Heat treatment route	Sample	Absorbed energy [J]	Mean	Standard deviation
Group A	1	40.8	35.3	7.8
	2	29.8		
Group B	1	28.0	23.9	5.9
	2	19.7		
Group C	1	40.0	34.5	7.8
	2	29.0		

Group A shows the highest average absorbed energy among the groups, demonstrating good energy absorption capacity, particularly in sample 1.

Group B shows the lowest average absorbed energy, which suggests lower toughness compared to the other groups. The reduced energy absorbed by sample 2 indicates a more brittle behavior.

Group C presents an average absorbed energy similar to that of Group A, indicating good toughness.

The results show a significant improvement when compared with references found in the literature. Wang *et al.* [14] (2020) obtained an absorbed energy of 15 J for the same material, a value much lower than those achieved with the different routes proposed here. The improvement in the results of this research compared to those of Wang *et al.* [14] (2020) is related to the use of incremental tempering temperatures, which favored increased toughness.

The hardness analysis shows the variation of hardness with respect to processing times and in relation to the way the samples were loaded into the furnace.

The variation in hardness values observed among the samples is associated with small differences in immersion and removal times due to their positioning in the furnace. Samples that are placed in the bath first are the last to be removed, which increases immersion time.

The samples from Group B showed the lowest average hardness values, while the samples from Group C showed the highest values.

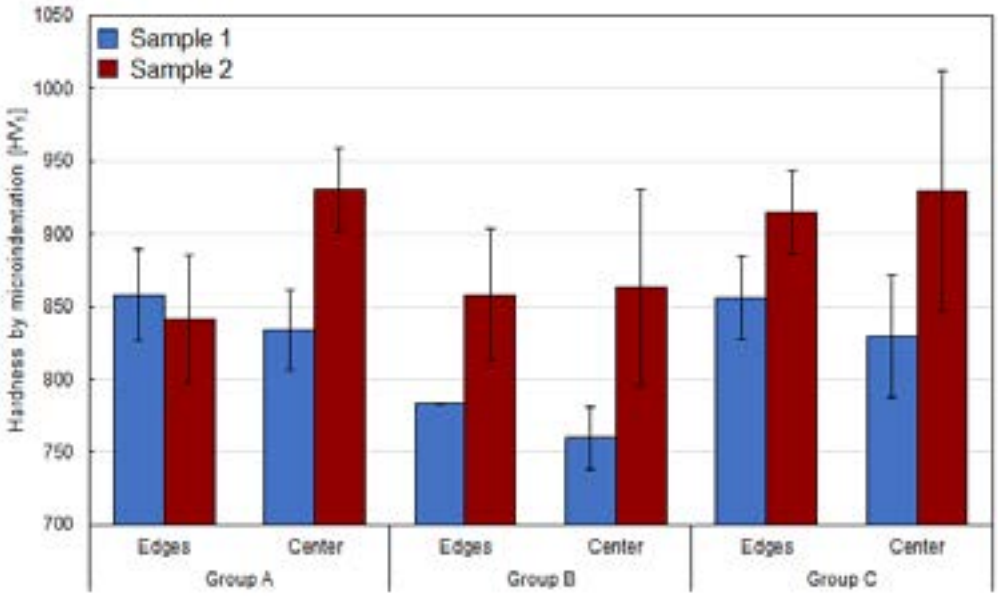


Figure 4. Hardness values according to the sample nº and measurement position. Source: Santos *et al.* [11].

The optimized heat treatment route increased both the hardness and toughness of the material, which is expected to extend the tool life in operation.

3.2 Improvement in the dimensional quality of the electrodes

The enhancement of the dimensional quality of the tool electrode for die manufacturing can be seen in Figure 5. For the control criteria Fα, Ffα, and FHα, it was observed that Strategy 3 achieved quality index Q2, followed by Strategy 2, which reached quality class Q4. The tool electrode manufactured using the traditional route obtained Q5 and Q6 values, significantly lower than the quality achieved with Strategy 3.

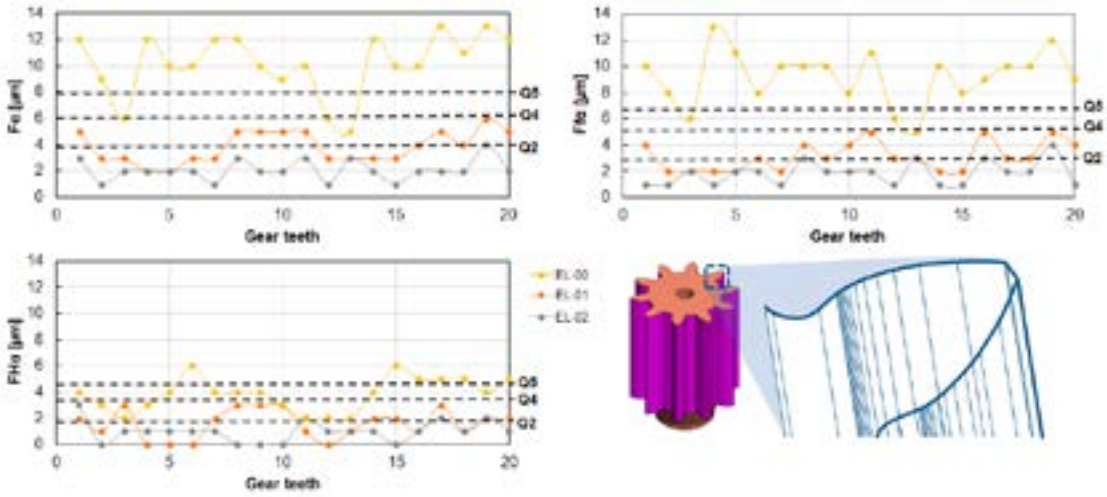
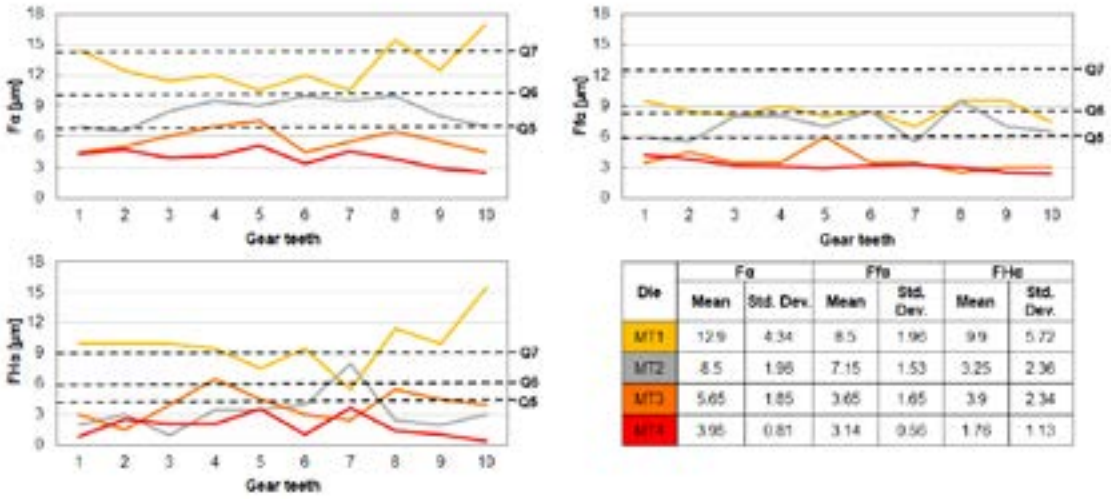


Figure 5. Tool electrode gear teeth profile deviation for different CAD profile generation. Builes *et al.* [15].

After cutting the tool electrode, the gear cold-forming die was eroded using

different strategies for pulse generation, electrode programming, GAP, and flushing of the working gap. The results of these variations can be seen in Figure 6.



Die	Fα		Ffα		Ffα	
	Mean	Std. Dev.	Mean	Std. Dev.	Mean	Std. Dev.
MT1	12.9	4.34	8.5	1.96	9.9	5.72
MT2	8.5	1.96	7.15	1.53	3.25	2.36
MT3	5.65	1.85	3.65	1.65	3.9	2.34
MT4	3.95	0.81	3.14	0.56	1.76	1.13

Figure 6. Die gear teeth profile deviation for different manufacturing routes. Builes *et al.* [15].

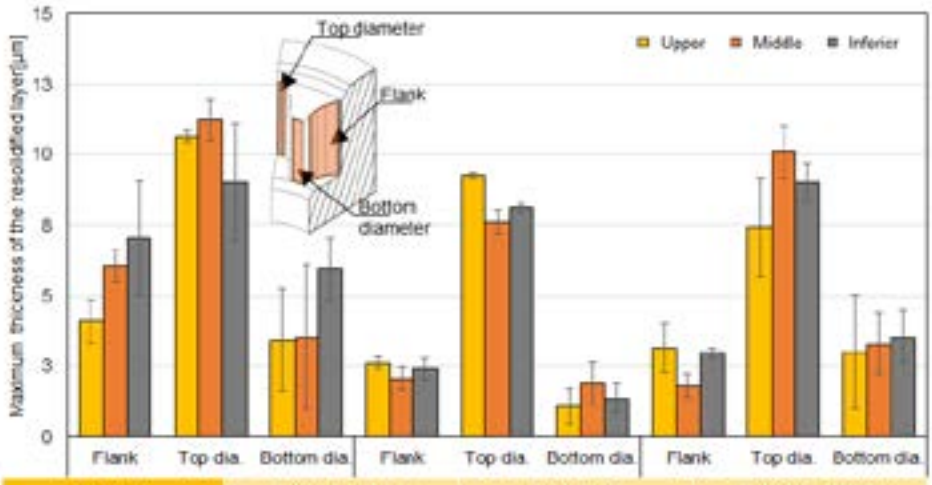
All machining strategies used for manufacturing dies MT2, MT3, and MT4 improved the gear quality of the dies. Notably, the strategy employed for die MT4 led to an improvement of approximately 82% compared to die MT1, which served as the process reference.

The significant improvement achieved with the MT4 strategy is attributed to the pulse generation process, the optimized programming for wear control, and the enhanced system for controlling and flushing the working gap. Sequential programming and electrode wear protection through the maintenance of energy density relative to the frontal erosion area proved to be the key differentiators.

When the thickness of the resolidified layer is evaluated (Figure 7), it can be observed that the flushing methodology of the working gap generated greater process stability and shorter erosion time, resulting in a reduced affected layer. Furthermore, when maintaining the same flushing process but changing the roughing and finishing GAP, there is a trend toward reducing the thickness of the resolidified layer.

Electrode movement is less effective in cleaning the working gap and increases the probability of particle resolidification on the surface, which in turn increases the white layer. On the other hand, the lower jet creates turbulence in the dielectric fluid, which hinders plasma channel closure and increases machining time. The advantage of the jet, however, is that it significantly reduces the resolidified layer.

Overall, adjusting electrode movement parameters and GAP reduced the thickness of the resolidified layer and shortened machining time by more than 20% compared to the reference machining process.



Flushing	Electrode motion	Inferior jet	Electrode motion
GAP	Smaller roughing GAP and larger finishing GAP	Smaller roughing GAP and larger finishing GAP	Larger roughing GAP and smaller finishing GAP
Machining time	100%	176%	81%
Low efficiency discharges and short-circuit	100	358	178

Figure 7. Influence of the EDMachining conditions on the resolidified layer thickness. Builes *et al.* [15].

3.3 ABRASIVE FLOW MACHINING

The simulation carried out in the area of the gear cold-forming die and the flow regulator shows that the pressure and fluid velocity along the gear cold-forming die are not homogeneous. The fluid velocity profile across the die surface and the flow regulator is shown in Figure 8. It can be observed that lower velocity profiles are present in sections U, I, and M.

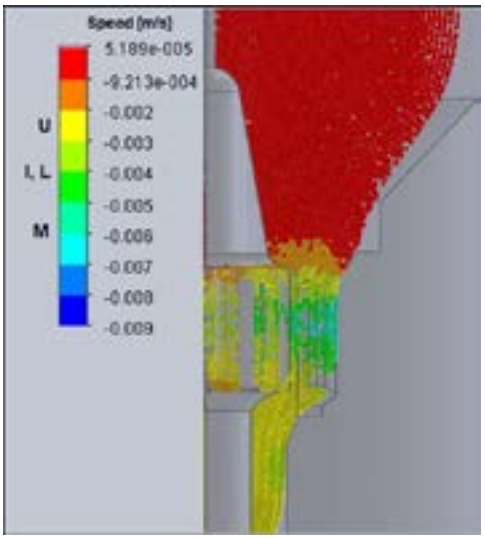


Figure 8. Abrasive flow machining simulation with a restrictor. Source: Duriex *et al.* [9].

Considering laminar flow, where the fluid flows smoothly and the ratio between inertial and viscous forces is less than 2000, an increase in velocity normally leads to a

decrease in pressure according to the law of energy conservation, which reduces abrasive penetration into the surface and the material removal rate. The simulation result is confirmed by the surface quality analysis. Compared to the process without the use of the restrictor, there was an increase in white layer (recast layer) removal across the different zones of the die, and even in the critical regions the entire white layer was removed, as shown in Figure 9.

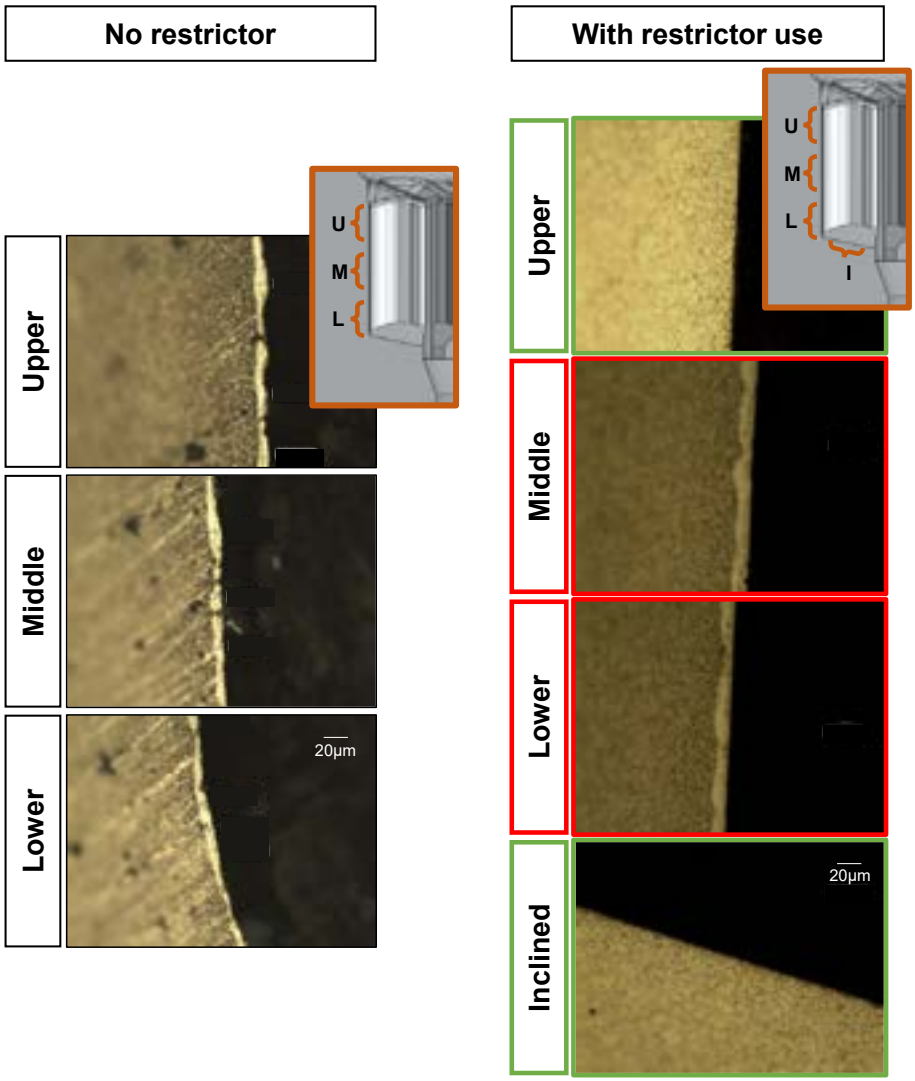


Figure 9. Optical imaging comparison between die sections without and with flow restrictor use. Duriex *et al.* [9].

Although the use of the restrictor did not create a homogeneous machining condition along the height of the die—resulting in irregular material removal across the die surface—the system accelerated die post-processing by 50%, proved effective in removing the resolidified layer, and improved surface polishing (Figure 10). These results are promising and pave the way for future studies on the topological optimization of the restrictor shape to ensure a homogeneous mass flow profile, thereby achieving uniform removal along the entire die, as well as better control of the amount of material removed.

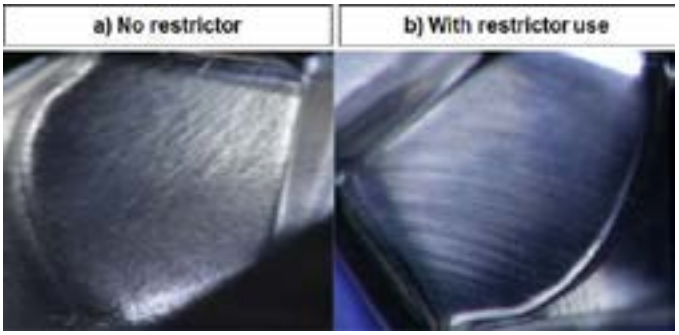


Figure 10. Gear teeth machined surface without (a) and with the use of a restrictor (b).

3.4 Production of Pinions

In terms of producing gears with improved quality, the results were extremely positive, as can be seen in Table 5.

Table 5. Pinion production comparison.

Parameter	**MT1**	**MT2**	**MT3**	**MT4**	**Improvement MT1 and MT3 (%)**	**Improvement MT0 and MT4 (%)**
	Mean (Qn)	Mean (Qn)	Mean (Qn)	Mean (Qn)		
Fα	12.9 (Q7)	8.5 (Q6)	5.65 (Q5)	3.9 (Q3)	34.11	69.77
ffα	8.5 (Q7)	7.15 (Q6)	3.65 (Q4)	3.15 (Q4)	15.88	62.94
fHα	9.9 (Q8)	3.25 (Q5)	3.9 (Q5)	1.88 (Q3)	67.17	81.01
fp	6.0 (Q6)	6.0 (Q6)	7.5 (Q7)	4.38 (Q5)	0.00	27.00
Fp	13.5 (Q5)	10.0 (Q4)	15.0 (Q5)	9.21 (Q4)	25.93	31.78
fu	8.0 (Q6)	8.5 (Q6)	7.5 (Q6)	4.49 (Q4)	-6.25	43.88

For the control criteria Fα, Ffα, and FHα, the improvement in the quality of the forged pinions was 69% for Fα, 62% for Ffα, and 81% for FHα.

Overall, the systematic investigation of the die manufacturing route enabled an increase in material hardness and toughness, reduction in manufacturing times, improvement in the dimensional and form accuracy of the die, enhancement of surface quality, improvement in the quality of the formed gears, higher productivity, and a significant increase in die life—extending the number of operational cycles by more than 15 times compared to the value at the beginning of the project.

4. Conclusions

This research demonstrated that studying and optimizing the manufacturing route of forming dies allows for financial, productivity, and quality gains. The following conclusions can be highlighted:

a) The optimization of austenitization times and tempering strategy significantly increased hardness without reducing the material's toughness;

b) The optimization of the tool electrode manufacturing process made it possible to produce electrodes with gear quality Q2, compared to an initial Q5;

c) The optimization of die-sinking EDM strategies, together with the use of higher-quality punches, enabled the production of gear forming dies with Q4 and Q5 quality and with a reduced resolidified layer thickness;

d) The use of abrasive flow machining combined with a restrictor increased the efficiency of recast layer removal and improved productivity;

e) The formed gears, produced with the implemented improvements, reached gear quality Q7; and

f) The service life of the forming tool increased by approximately 15 times.

ACKNOWLEDGMENT

The preferred spelling of the word "acknowledgment" in American English is without an "e" after the "g." Use the singular heading even if you have many acknowledgments.

REFERENCES

[1] Gemaque, M. J. A. Abordagem para solução de um problema metrológico na indústria: medição de engrenagens. 2004. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

[2] Bôas, D. V. Uma Contribuição ao Estudo do Forjamento a Frio de Engrenagens Helicoidais. Tese (Doutorado). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009, 183 p.

[3] Hirschvogel, M.; Dommelem, H.V. Some application of cold and warm forging. In: Journal of Materials Processing Technology, vol. 35, 1992, pp. 343-356.

[4] Bôas, D. V. Estudo de processo de forjamento a frio de peças automotivas. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999, 116 p.

[5] ISO 1328-1. Cylindrical Gears - ISO system of accuracy, Part 1. Definitions and allowable values of deviations relevant to radial composite deviations and runout information, 2013.

[6] Silveira, F. D. Estudo da influência dos anéis de cintamento sobre as matrizes de extrusão a frio de engrenagens cilíndricas de dentes retos com o aço SAE 10B22 para a indústria automobilística. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

[7] ASM Handbook. Machining. 9 ed, vol. 16. ASM International, 1999.

[8] Davies, P. J. The Rheological and Honing Characteristics of Polyborsiloxane/Grit Mixtures. Tese (Doutorado). Sheffield Hallam University, 1993.

[9] Duriex, M. S.; Builes, S.D.; Xavier, F.A.; Filho, C.H.; Bordin, F.M. Einfluss einer Drosselvorrichtung im Druckfließläppen auf die Genauigkeit und Oberflächenbeschaffenheit einer Kaltumformzahnradmatrize. Schweizer Schleif-Symposium 2024.

[10] ASTM E23 - American Society for Testing and Materials. Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials. Philadelphia, USA, 2012.

[11] Santos, B.C. Estudos comparativo da influência do tratamento térmico na tenacidade e microestrutura de aços ferramenta sinterizados. Anais do 13º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Salvador, BA, 2025.

[12] Cardoso, G.K.; Bordin, F.M.; Builes, S.D.; Filho, C.H.; Xavier, F.A. Influência da estratégia de construção de perfis na qualidade de eletrodos no corte por eletroerosão a fio. Anais do XXVI Colóquio de Usinagem Campinas, SP, 2024.

[13] Reitz, L. F. Avaliação da classe de engrenagem de dentes retos na fabricação de matrizes para forjamento a frio. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado) – Centro Universitário de Brusque – UNIFEBE, Brusque, 2017.

[14] Wang, H.; Hong, D.; Hou, L.; Ou, P.; Wang, Z.; Shen, L. Influence of tempering temperatures on the microstructure, secondary carbides and mechanical properties of spray-deposited AISI M3:2 high-speed steel. Materials Chemistry and Physics, vol. 255, pp. 123554, 2020.

[15] Builes, S.D.; Bordin, F.M.; Jaguszeski, E.O.; Cardoso, G.S.M.; Silva, R.J.; Xavier, F.A. Metodologia para aprimoramento da precisão dimensional do processo de eletroerosão por penetração: estudo de caso. Anais do XXVII Colóquio de Usinagem 2025, Belo Horizonte, MG, 2025.

44º SENAFOR

28th International Forging Conference
14th International Sheet Metal Forming Conference / 11th BrDDRG Congress
14th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies – Brazil/RS
3rdInternational Conference on Innovation in Materials and Manufacturing
Hotel Plaza São Rafael – P. Alegre RS, October 1-3, 2025

ANÁLISE NUMÉRICA DA INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DE FISSURAS NA CAMADA DE ÓXIDO DURANTE A SOLDAGEM EM ESTADO SÓLIDO POR COMPRESSÃO

Brenick Resende Assumpção [1]
Adriano Amâncio Trajano [2]
Olavo Carvalho Haase [3]
Maria Teresa Paulino Aguilar [4]
Paulo Roberto Cetlin [5]

RESUMO

A soldagem em estado sólido por compressão requer a ruptura das camadas de óxido para possibilitar o contato metal-metal. Com base na teoria do filme, este trabalho emprega simulação numérica bidimensional para analisar a influência da geometria de fissuras interfaciais nos mecanismos iniciais de adesão. Variações na largura da fissura permitiram avaliar a extrusão do substrato metálico e a efetividade da aproximação entre as chapas. Os resultados indicam que apenas certas geometrias favorecem o contato entre superfícies limpas, enquanto outras resultam em falha da união, mesmo sob pressão elevada.

Palavras-chave – Soldagem em Estado Sólido, Teoria do Filme, Análise em Elementos Finitos.

ABSTRACT

Solid-state welding by compression requires the rupture of oxide layers to enable metal-to-metal contact. Based on film theory, this work employs two-dimensional numerical simulation to analyze the influence of interfacial crack geometry on the initial adhesion mechanisms. Variations in crack width were used to assess substrate extrusion and the effectiveness of the approach between plates. Results indicate that only certain geometries favor contact between clean surfaces, while others lead to failed bonding even under high pressure.

Keywords – Solid-State Welding, Film Theory, Finite Element Analysis.

[1] Mestrando em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil, brenick@ufmg.br
[2] Dr.; Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil, adriano.a.trajano@gmail.com
[3] Msc.; Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil, olavohaase@ufmg.br
[4] Prof. Dr.; Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil, teresa@ufmg.br
[5] Prof. Dr.; Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil, pcetlin@ufmg.br

1. INTRODUÇÃO

A união de metais em estado sólido por compressão, também conhecida como solda a frio, é um processo de crescente interesse para aplicações industriais que exigem conexões metálicas sem aquecimento/fusão, como em dispositivos eletrônicos, componentes automotivos ou ligas sensíveis ao calor. Diferente dos processos usuais de soldagem, a adesão entre superfícies metálicas neste caso requer o contato direto entre substratos livres de óxidos e contaminantes, o que impõe desafios específicos à sua modelagem e controle.

Um dos principais obstáculos à formação da união é a presença de películas de óxido nas superfícies metálicas, que atuam como barreiras à ligação metal-metal. Segundo a teoria do filme [1], a adesão sólida só é possível quando essas camadas são fraturadas e o material metálico abaixo é extrudado localmente para entrar em contato com o substrato oposto. O sucesso da união, portanto, depende da ruptura do óxido, da mobilidade do material metálico e da condição de aproximação entre as superfícies.

Diversos estudos têm abordado os mecanismos físicos envolvidos nesse processo, tanto do ponto de vista experimental quanto numérico. Simulações com elementos finitos podem ser utilizadas para visualizar os estados locais de tensão e deformação que favorecem ou inibem a adesão [2], [3]. No entanto, a maioria dessas análises foca em situações em que a união ocorre com sucesso, havendo ainda lacunas quanto à modelagem das condições que inviabilizam a adesão, como no caso de fissuras interfaciais que limitam o fluxo plástico ou impedem a extrusão do metal base.

Neste contexto, o presente trabalho utiliza modelagem numérica bidimensional para investigar o papel da geometria da fissura interfacial na formação da solda em estado sólido por compressão. Por meio de simulações com variação controlada da largura e profundidade da trinca, busca-se identificar, qualitativamente, condições geométricas mínimas associadas ao sucesso ou fracasso da adesão, contribuindo para uma compreensão mais abrangente da teoria do filme sob o ponto de vista mecânico.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Teoria do Filme

Uma das hipóteses amplamente aceitas para explicar o mecanismo de união por deformação plástica em metais é a "Teoria do Filme". Uma série de testes sobre a soldagem a frio do cobre em condições de ultra-alto vácuo foi realizada [2]. Segundo suas observações, quando duas superfícies metálicas são pressionadas na ausência de oxidação, os grãos cristalinos se unem, formando uma ligação metalúrgica. No entanto, em condições atmosféricas, as superfícies metálicas estão sempre cobertas por uma fina camada de óxido e outros contaminantes. Esse filme superficial atua como uma barreira que impede a iniciação da união no metal de base. Diferente do substrato metálico que é dúctil, o filme superficial é de natureza frágil e pode se romper sob grandes deformações. Desta forma, o metal virgem pode ser extrudado para os espaços abertos criados pela fratura da camada frágil, permitindo que os dois substratos opostos entrem em contato e estabeleçam uma ligação metalúrgica entre eles. Portanto, a qualidade da ligação criada é altamente influenciada pelo filme de óxido. A Figura 1 ilustra esse processo.

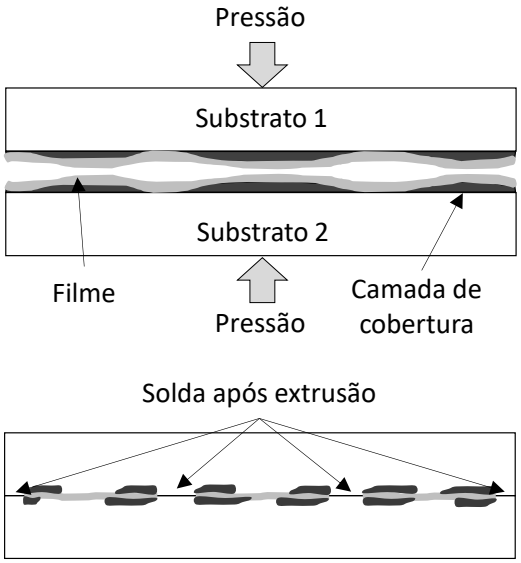


Figura 1: Representação Esquemática do processo de união conforme a Teoria do Filme. Adaptado de (BAY, 1983). Adaptado de [1].

A preparação da superfície é um fator determinante nos mecanismos de formação da ligação na soldagem a frio [3]. Em condições atmosféricas normais, a adesão só ocorre se houver deformação suficiente para fraturar o filme superficial, de modo que o tipo de preparação influencia diretamente a natureza dessa camada. Esse parâmetro é especialmente relevante em processos como laminação e indentação, e pode ser realizado por limpeza química, limpeza mecânica ou pela aplicação de uma camada frágil [3]. Entre os métodos estudados estão a escovação com aço, niquelamento (eletroquímico fosco e brilhante, e químico), anodização e desengraxe com acetona. Os resultados indicam que a escovação gera boas uniões, mas exige aplicação imediata antes da soldagem, enquanto o niquelamento, sobretudo o fosco, apresenta maior reprodutibilidade e é mais adequado ao uso industrial. A Figura 5 mostra os resultados de resistência ao cisalhamento de uniões a frio obtidos em função do tratamento superficial, para diferentes níveis de deformação das chapas em contato [3].

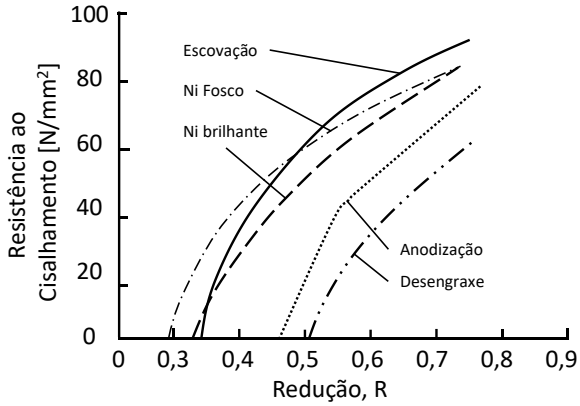


Figura 2: Resistência da solda em função do tipo de tratamento da superfície. Adaptado de [3].

Outro aspecto importante é a deformação mínima necessária para que a união seja efetiva. Estudos mostram que, durante a soldagem a frio, ocorre uma fase inicial de fluxo plástico facilitado, caracterizada por um aumento súbito da resistência da junta [4]. A deformação correspondente a esse ponto é considerada a mínima deformação de soldagem. A Figura 3 ilustra esse fenômeno [4].

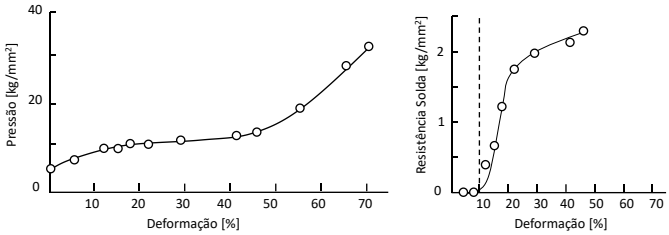


Figura 3: Pressão e resistência da solda por deformação para o Alumínio. Adaptado de [4].

3. SIMULAÇÕES

O estudo foi conduzido por meio de simulação numérica bidimensional em estado plano de deformação, representando duas chapas metálicas sobrepostas separadas por uma fina camada intermediária de óxido. No centro dessa camada foi introduzida uma fissura de geometria controlada, simulando uma fratura localizada no filme de óxido.

A configuração adotada permite investigar de forma isolada o efeito da largura da fissura na ocorrência ou não de extrusão do substrato metálico e consequente contato metal-metal. Foram avaliadas diferentes larguras de fissura, mantendo a espessura da camada de óxido e demais dimensões constantes.

3.1 Propriedades de Materiais

As chapas metálicas foram modeladas como alumínio elastoplástico com curva tensão–deformação obtida via modelo constitutivo de Johnson–Cook (JC), calibrado a partir das propriedades elásticas (E = 70 GPa, ν = 0,33) e do comportamento plástico alvo (σ_y = 150 MPa e σ_r = 400 MPa). No JC adotado, efeitos de taxa de deformação e amolecimento térmico foram desativados (C = 0 e m = 0), adequando o material a um regime quase-estático e isotérmico. A camada de óxido foi representada como material elástico linear rígido, sem plastificação, refletindo seu papel de barreira mecânica à extrusão do substrato. A Tabela 1 apresenta os dados utilizados.

Tabela 1: Parâmetros dos materiais.

Componente	Densidade (ton/mm^3)	Módulo E (MPa)	v (-)	Modelo	Parâmetros JC (A, B, n, C, m)
Chapa (Alumínio)	$2{,}70\times10^{-9}$	70000	0,33	Johnson–Cook	A = 89,1; B = 410,9; n = 0,24; C = 0; m = 0
Camada de óxido (rígida)	$7{,}85\times10^{-9}$	210000	0,30	Elástico linear	—

A **Figura 4** apresenta o gráfico de engenharia e verdadeiro da curva elastoplástica utilizada para o alumínio, conforme a parametrização JC aplicada no Abaqus.

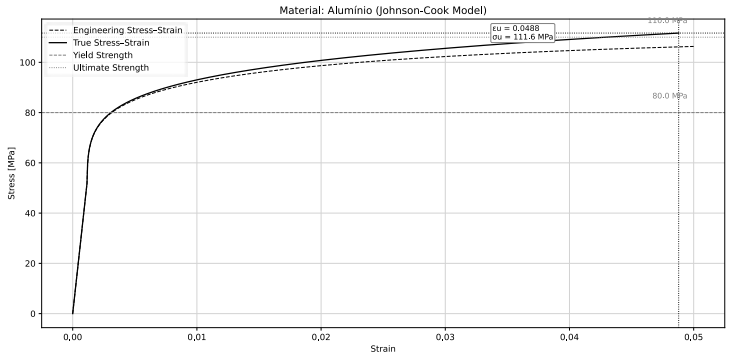


Figura 4: Curva elastoplástica do material Alumínio.

3.2 Condições de Contorno e Carregamento

A base da chapa inferior foi completamente restringida no eixo vertical (Y), mantendo liberdade horizontal (X). O conjunto foi confinado lateralmente para representar uma condição pontual (a liberdade horizontal implicaria em expansão e abertura da trinca, não sendo o objetivo do trabalho). Um deslocamento vertical prescrito foi aplicado no topo da chapa superior, comprimindo o conjunto. Em todas as análises o deslocamento vertical foi mantido o mesmo com o objetivo de verificar os níveis de deformação plástica equivalente e extrusão (ou não extrusão) sob um mesmo cenário – variando-se apenas as dimensões da fissura.

Foi utilizada a definição de *general contact* com coeficiente de atrito de 0,15. Os contatos definidos foram: chapa superior ↔ óxido; chapa inferior ↔ óxido; chapa superior ↔ chapa inferior, no qual é ativado automaticamente pelo solver em casos de extrusão e aproximação dos substratos através da fissura. Esse último contato é o responsável pela adesão no mecanismo de união da teoria do filme.

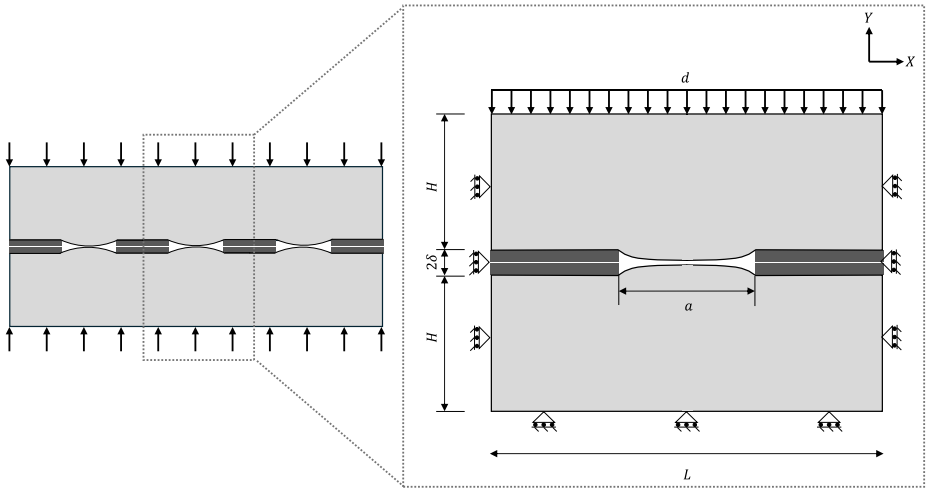


Figura 5: Condições de contorno e parâmetros do modelo.

3.3 Geometria e Variações Paramétricas

A geometria do modelo é composta por três elementos principais: a chapa superior (substrato 1), a camada de óxido, que se estende por toda a largura exceto na região da fissura, e a chapa inferior (substrato 2). Foram simuladas diferentes dimensões de fissuras, contemplando tanto situações em que não se espera extrusão (fissura muito estreita) quanto casos em que a extrusão é favorecida. A Figura 5 ilustra os parâmetros do modelo, sendo a dimensão "a" o parâmetro de controle do tamanho da fissura. Os demais parâmetros geométricos, como largura das chapas (L), altura das chapas (H) e altura do óxido (δ), foram mantidos constantes.

3.4 Estratégia de Simulação

Dada a elevada não linearidade do problema (grandes deformações, plastificação localizada e contato evolutivo), optou-se pelo uso do *Abaqus/Explicit*, evitando dificuldades de convergência típicas de análises implícitas.

Para manter o caráter quase-estático a velocidade de aplicação do deslocamento foi escolhida de forma a manter a razão de energia cinética/energia interna (ALLKE/ALLIE) inferior a 5% durante toda a simulação. A malha foi refinada localmente na região da fissura para capturar gradientes elevados de deformação.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 6 e a Figura 7 apresentam os resultados obtidos das simulações numéricas

para diferentes geometrias de fissura na camada de óxido. Cada subfigura mostra a situação antes da deformação e o campo de deformação plástica equivalente (PEEQ) nas chapas de alumínio.

Observa-se que, para fissuras extremamente estreitas, a deformação permanece distribuída, sem que ocorra extrusão significativa de material metálico através da abertura. Nessa configuração, mesmo sob compressão elevada, o substrato não alcança contato direto com a chapa oposta, sugerindo falha na adesão.

Por outro lado, quando a fissura apresenta dimensões maiores, o campo de PEEQ evidencia a formação de zonas plásticas que convergem para a abertura, possibilitando a extrusão do substrato através da fissura. Esse fenômeno resulta em contato metal-metal efetivo, condição necessária para a adesão conforme a teoria do filme. A transição entre os dois comportamentos evidencia a existência de uma geometria crítica da fissura, abaixo da qual não há fluxo plástico suficiente para promover a união.

De forma qualitativa, os resultados confirmam que: (i) A morfologia da fissura exerce papel determinante no início da extrusão; (ii) O campo de deformações plásticas fornece uma medida clara da intensidade do fluxo metálico; (iii) Existe um limiar crítico de abertura da trinca associado ao início da adesão potencial.

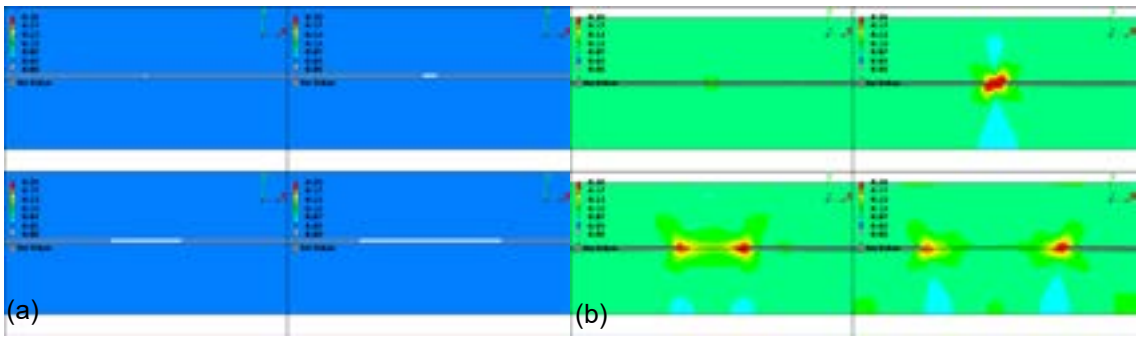


Figura 6: Resultados (a) antes da deformação (b) após deformação.

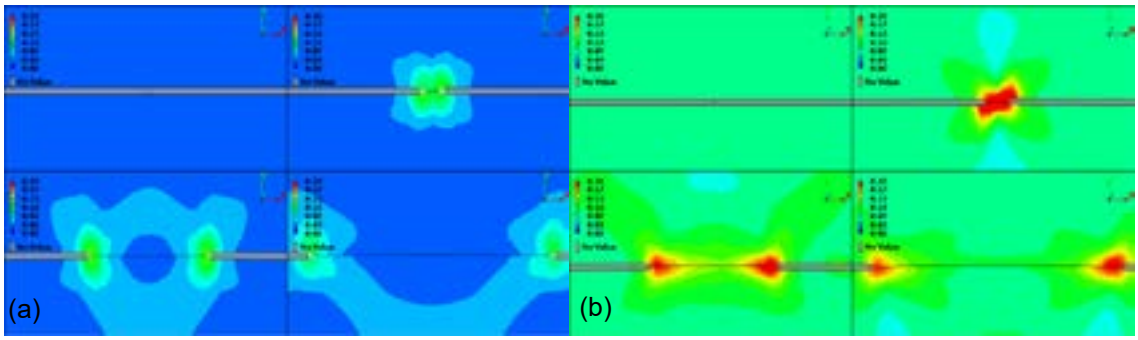


Figura 7: Detalhes dos resultados (a) durante o processo e (b) ao final do deslocamento.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma análise numérica da influência da geometria de fissuras na camada de óxido durante a soldagem em estado sólido por compressão, à luz da teoria do filme. As simulações bidimensionais mostraram que:

I. Fissuras muito estreitas não permitem a extrusão do metal base, com deformação plástica distribuída, e inviabilizando o contato metal-metal.

II. Fissuras acima de um limiar favorecem a convergência das zonas plásticas para a abertura, possibilitando a extrusão do alumínio e a adesão entre

substratos.

III. Existe, portanto, uma dimensão crítica da fissura abaixo da qual a adesão não ocorre, mesmo sob compressão elevada.

IV. O campo de deformação plástica equivalente (PEEQ) mostrou-se uma ferramenta eficaz para identificar o início da extrusão e caracterizar o fluxo metálico em direção à fissura.

De forma qualitativa, os resultados reforçam a validade da teoria do filme e evidenciam a importância da morfologia da camada de óxido no mecanismo de união. Como perspectivas futuras, sugere-se ampliar o estudo para fissuras com diferentes geometrias (profundidade variável, múltiplas fissuras) e integrar análises experimentais para validar os resultados numéricos.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – Brasil (CNPq). Os autores agradecem, ainda, o apoio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais (PPGMEC/UFMG).

REFERÊNCIAS

[1] N. Bay, “Mechanisms Producing Metallic Bonds in Cold Welding,” *Welding Research Supplement,* pp. 137-142, 1983.

[2] H. Conrad e L. Rice, “The Cohesion of Previously Fractured Fcc Metals in Ultrahigh Vacuum,” *Metallurgical Transactions,* vol. 1, pp. 319-329, 1970.

[3] N. Bay, “Cold welding. Part 3: influence of surface preparation on bond strength,” *Metal Construction,* 1986.

[4] H. A. Mohamed e J. Washburn, “Mechanism of Solid State Pressure Welding,” *WRC Bulletin,* vol. 8, pp. 302-310, 1975.

[5] K. Khaledi, S. Rezaei, S. Wulfinghoff e S. Reese, “Modeling of joining by plastic deformation using a bonding interface finite element,” *International Journal of Solids and Structures,* vol. 160, pp. 68-79, 3 2019.

[6] K. Khaledi, S. Rezaei, S. Wulfinghoff e S. Reese, “A microscale finite element model for joining of metals by large plastic deformations,” *Comptes Rendus - Mecanique,* vol. 346, nº 8, pp. 743-755, 8 2018.

[7] M. Iordachescu e E. Scutelnicu, “AN OVERVIEW OF WELDING IN SOLID STATE”.

[8] N. Bay, “Cold welding. Part 2: process variants and applications,” *Metal Construction,* 1986.

[9] N. Bay, C. Clemensen e O. Juelstorp, “Bond Strength in Cold Roll Bonding,” *CIRP Annals - Manufacturing Technology,* vol. 34, nº 1, pp. 221-224, 1985.

[10] N. Bay, “Cold Pressure Welding—The Mechanisms Governing Bonding,” *Journal of Engineering for Industry,* vol. 101, nº 2, pp. 121-127, 5 1979.

[11] N. Bay, “Cold welding. Part 1: characteristics, bonding mechanisms, bond strength,” *Metal Construction,* vol. 18, pp. 369-372, 6 1986.

44º SENAFOR

28ª Conferência Internacional de Forjamento - Brasil
14ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas / 11º Congresso do BrDDRG
14ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis
3ª Conferência Internacional de Inovação em Materiais e Manufatura
Porto Alegre, RS, dias 1, 2 e 3 de outubro de 2025
www.senafor.com

The Role of Tension-Compression Stress on TRIP and TWIP effects in a 201LN Austenitic Stainless Steel

Diogo Pedrino Braga [(1)]
Danielle Cristina Camilo Magalhães [(1)]
Carlos Alberto Della Rove [(1)]
José Benaque Rubert [(2)]
Andrea Madeira Kliauga [(1)]

[(1)] Department of Materials Engineering, Federal University of São Carlos, São Carlos, São Paulo, Brazil
[(2)] Department of Mechanical Engineering, Federal University of São Carlos, São Carlos, São Paulo, Brazil

ABSTRACT

Austenitic stainless steels (ASS) with low nickel and high manganese content exhibit low stacking fault energy (SFE), resulting in the metastability of the austenitic matrix, as well as Twinning-Induced Plasticity (TWIP) and Transformation-Induced Plasticity (TRIP) effects. This study investigates the anisotropy of ASS 201LN, which exhibits TWIP and TRIP effects, by comparing tensile and compression tests to evaluate the influence of crystallographic orientation and friction on the material's behavior. Although the Schmid factor analysis suggests a greater tendency for twinning under compression, the deformation heterogeneity caused by friction leads to conflicting results.

X-Ray Diffraction (XRD) measurements showed less martensite formation in compression than in tension, whereas Electron Backscatter Diffraction (EBSD) analyses at the center of the samples indicated the opposite. Finite Element Method (FEM) simulations and microhardness tests clarified this discrepancy, showing that the stress and strain distribution is non-uniform under compression. It was found that the rate of martensite transformation is similar at opposite stress and the average phase fraction predicted by the simulation aligned with the XRD data.

Keywords – austenitic stainless steel; compression tests; XRD, EBSD; TRIP/TWIP

RESUMO

Aços inoxidáveis austeníticos (AIA) com baixo teor de níquel e alto teor de manganês exibem baixa energia de falha de empilhamento (EFE), resultando na metaestabilidade da matriz austenítica, bem como nos efeitos de Plasticidade Induzida por Maclação (TWIP) e Plasticidade Induzida por Transformação (TRIP). Este estudo investiga a anisotropia do AIA 201LN, que apresenta efeitos TWIP e TRIP, comparando testes de tração e compressão, buscando avaliar a influência da orientação cristalográfica e do atrito no comportamento do material. Embora a análise do fator de Schmid sugira uma maior tendência à maclação sob compressão, a heterogeneidade da deformação causada pelo atrito gera resultados conflitantes.

Medições de Difração de Raios-X (DRX) mostraram menos formação de martensita em compressão do que em tração, enquanto análises de Difração de Elétrons Retroespalhados (EBSD) no centro das amostras indicaram o oposto. Simulações por Elementos Finitos (FEM) e ensaios de microdureza esclareceram essa discrepância, mostrando que a distribuição de tensão e deformação é não uniforme sob compressão. Foi verificado que a taxa de transformação de martensita é similar em tensões opostas e a fração de fase média prevista pela simulação alinhou-se com os resultados de DRX.

Palavras-chave: aço inoxidável austenítico; ensaio de compressão DRX; EBSD; TRIP/TWIP

1. INTRODUCTION

Austenitic stainless steels (ASS) with low nickel and high manganese content, such as the 200 series, represent a class of materials of significant industrial interest due to their unique combination of properties and cost-effectiveness. Their microstructure is characterized by a low stacking fault energy (SFE), which results in the metastability of the austenitic matrix [1]. This characteristic enables advanced deformation mechanisms, such as Twinning-Induced Plasticity (TWIP), in an SFE range of 20 to 40 mJ/m², and Transformation-Induced Plasticity (TRIP), for values below 20 mJ/m² [2,3]. These mechanisms promote a remarkable work-hardening effect, leading to a simultaneous increase in mechanical strength and toughness, making these steels ideal for applications in the transportation, chemical, and food industries [4].

The plastic behavior of these materials is sensitive to several processing variables. Temperature, for example, directly affects the SFE, with studies showing an almost proportional decrease in SFE with a reduction in temperature, at a rate that can vary from 0.05 to 0.15 mJ/m² °C for different alloys [5, 6]. Strain rate is also crucial; higher rates can generate adiabatic heat, increasing the SFE and consequently suppressing the TWIP and TRIP effects [8,9]. However, the influence of the stress state (e.g., tension versus compression) is considerably more complex and less understood.

The scientific literature presents a robust body of knowledge on the behavior of these steels under uniaxial tension [10-11], but studies focused on the response under compression are scarce and show conflicting results. For instance, while some researchers] reported that tension promotes a higher fraction of transformed martensite [7, 12], other works observed the opposite for 304 steel [13]. Still others, suggested a

more complex relationship where the trend reverses at higher strain levels [9, 14]. It is clear, therefore, that predicting the material's behavior under different loading types is not straightforward, and this uncertainty is even greater for the less-studied 200 series steels.

This work seeks to elucidate this discrepancy by investigating the hypothesis that the observed difference between tension and compression results can be attributed to two main factors: the evolution of crystallographic orientation (texture) and the friction between the material's surface and the testing equipment. The direction of material flow in each deformation mode develops distinct textures, altering the Schmid factors and thus favoring or inhibiting the martensitic transformation ($\gamma \rightarrow \alpha'$) [15, 16]. Additionally, friction, especially in compression tests, generates a non-uniform distribution of stresses and strains, creating gradients of stress triaxiality [12] that affect the intensity and distribution of the hardening mechanisms.

Therefore, the objective of this study is to determine the degree of influence of crystallographic orientation and friction on the plastic anisotropy of the TRIP and TWIP effects in an AISI 201LN steel. Through a detailed comparison of data from mechanical tests, hardness tests, computational finite element simulations, and analyses by X-Ray Diffraction (XRD) and Electron Backscatter Diffraction (EBSD), this research offers a novel analysis focused on a 200-series material under both loading modes, with special emphasis on the effects of friction.

2. EXPERIMENTAL PROCEDURES

The material used was an ASS AISI 201LN (UNS S20153), provided by Aperam South America as 28 mm thick plates produced by continuous casting and hot strip rolling. The chemical composition (in wt.%) of the material as reported by the suppliers is indicated was: 17.02% Cr, 6.87% Mn, 4.02 Ni, 0.0027% C, 0.16% N, and balance Fe.

Test specimens for tensile and compression tests were machined with their main axis parallel to the rolling direction. To ensure a homogeneous initial state, the machined specimens underwent a solution annealing heat treatment in a vacuum furnace at 1050 °C for 30 minutes, followed by a rapid water quench. The resulting material had a uniform austenitic matrix with some residual ferrite oriented in the rolling direction, and an average grain size of 37 ±5 μm. The SFE was estimated by chemical composition to be 12.6 mJ/m² at room temperature and 19.6 mJ/m² at 100 °C, using established models [3, 17].

The mechanical characterization involved both tensile and compression tests, conducted at room temperature (RT) and 100 °C using an INSTRON 5500R universal testing machine. All tests were performed in triplicate with an initial strain rate of 10^{-3} s^{-1} to observe potential TWIP and TRIP effects. The true stress-strain curves from these tests were used to analyze the strain hardening behavior via the Kocks-Mecking approach ($\theta=d\sigma/d\varepsilon$) [18].

After mechanical testing, the specimens were analyzed ex-situ at RT. For all analyses, specimens were sectioned longitudinally. X-Ray Diffraction (XRD) analyses were performed on the annealed and deformed specimens, and the primary goal was to quantify the volumetric fraction of austenite (γ), α' martensite, and ε_{HCP} martensite phases. Vickers microhardness measurements were taken on the polished longitudinal sections. For tensile specimens, measurements were taken along the central axis near the neck region, while for compression specimens, a full hardness map of the cross-section was generated.

Electron Backscatter Diffraction (EBSD) was conducted to examine the microstructural evolution. Finite Element Method (FEM) simulations of the compression tests were performed using DEFORM® 3D software. The experimental true stress-strain curves from the tensile tests at RT and 100 °C were used as the constitutive model for the material. The simulations replicated the interrupted compression deformations up to 50% strain, varying the coefficient of friction (μ) between 0.2 and 0.5 to study its effect on the deformation process.

3. RESULTS

The tensile and compression flow curves for ASS 201LN were obtained at RT and 100 °C, corresponding to SFE that promote TRIP and TWIP mechanisms. The effect of adiabatic heating was considered negligible for the tested strain rate.

At 100 °C, the mechanical behavior was similar for both tension and compression. However, at RT, a notable divergence was observed. Compression tests at RT showed an earlier onset of strain hardening, but the maximum flow stress was slightly lower than that observed in tension. This difference is attributed to the varying influence of the TRIP and TWIP effects under different stress states.

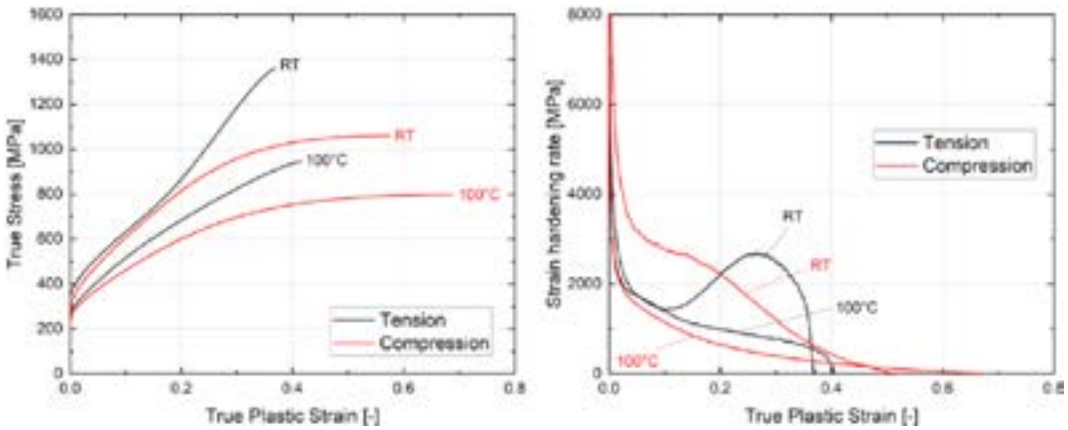


Figure 1: Typical true stress vs. true plastic strain (a) and strain hardening vs. true plastic strain (b) curves for tensile and compression tests for the ASS 201LN.

To analyze the microstructural evolution, phase transformation was quantified using ex-situ X-ray diffraction (XRD) on specimens from interrupted tests. The analysis identified peaks for both austenite (γ) and α'-martensite. The initial material contains a residual ferrite (α) phase, which shares diffraction peaks with the induced α'-martensite. The volume fraction of transformed α'-martensite was calculated assuming a constant residual ferrite content of 6.3%. The results align with the mechanical behavior, showing that the fraction of transformed martensite is greater in tension than in compression. A key observation is that the martensite fraction appears to saturate under compression, whereas it continues to increase with strain under tension.

To understand the spatial distribution of the transformed martensite, microhardness measurements were performed on the interrupted test specimens. For the tensile tests, the hardness values were found to be uniformly distributed throughout the analyzed cross-section of the specimens. Conversely, the compression specimens showed a non-uniform hardness distribution. A distinct 'X'-shaped region of higher hardness formed in the center of the specimens, while the hardness at the edges remained lower. This strongly suggests that martensite formation during compression is not uniform, but rather concentrated in this central region.

By establishing a direct relationship between flow stress and hardness from the uniform tensile test data, the hardness maps from the compression tests were converted into stress distribution maps, visualizing the heterogeneous stress state within the material under compressive load.

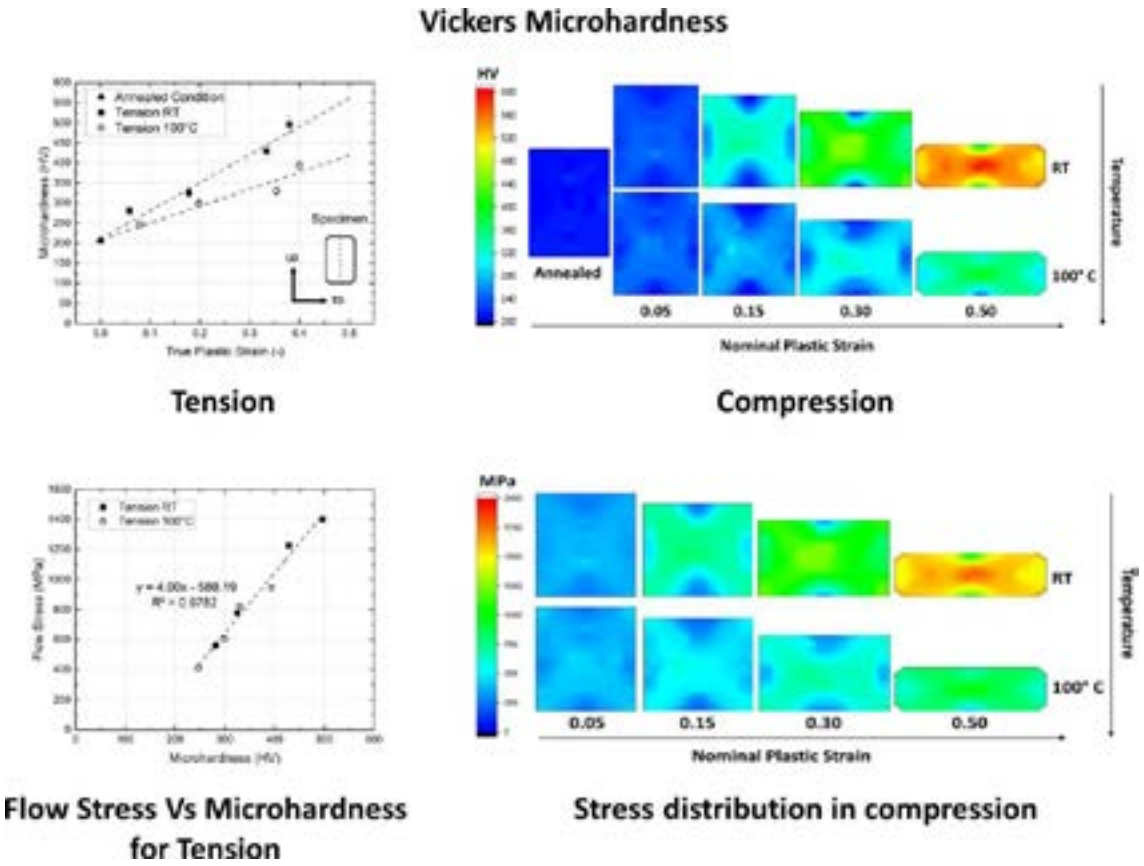


Figure 2: Hardness variation by ex-situ analyses on the longitudinal cross-section for tensile specimens and hardness maps in compression specimens after interrupted tests. Correlation between flow stress and hardness for interrupted tensile tests and stress distribution in compression tests based on this correlation. LD is the longitudinal direction and TD is the transverse direction.

EBSD analysis was conducted to investigate the microstructural evolution in the center of the specimens. The results show the progressive formation of deformation twins (TWIP effect) and both ε_{HCP} and α' martensite (TRIP effect) with increasing strain.

Quantitative EBSD analysis revealed a higher local fraction of martensite in the center of compression specimens compared to tensile specimens. This result, which initially seems to contradict the bulk XRD measurements, confirms the non-uniform deformation suggested by the hardness maps. The TRIP effect is highly concentrated in the central region during compression.

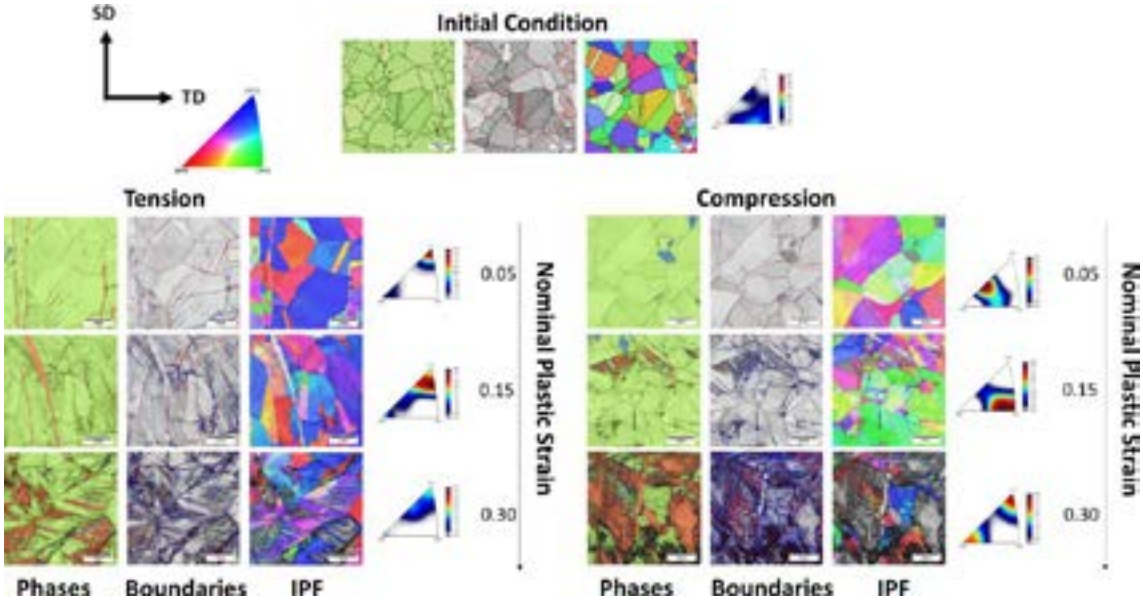


Figure 3: Phases map, grain boundary and inverse pole figure maps for austenite phase by ex-situ EBSD in samples from initial condition and interrupted tensile and compression tests at RT. Austenite in green, ε_{HCP} martensite in blue and α' martensite and ferrite in red. Annealing twins in red and low-angle boundaries (< 5◦) in blue. Stress (SD) and transverse directions (TD) as references. IPF map with respect to the normal direction.

To understand the non-uniform behavior in compression, FEM simulations were conducted, modeling the test with varying friction coefficients (μ). The simulations, particularly with a high friction of μ=0.5, successfully replicated the 'X'-shaped stress concentration in the specimen's center, showing excellent agreement with the experimental hardness maps.

A critical insight from the simulation is that due to this friction-induced heterogeneity, the local equivalent strain at the specimen's center is significantly higher than the nominal strain applied to the bulk material. This means the standard stress-strain curve does not accurately represent the material's state in the region where deformation is concentrated.

Therefore, a corrected local stress-strain curve for the center was constructed using local strain values from the simulation and local stress values derived from the hardness measurements. Remarkably, this corrected curve for compression closely matched the experimental stress-strain curve from the tensile test.

This finding leads to the main conclusion: the intrinsic material behavior and the TRIP effect are fundamentally very similar under both tension and compression when compared at the same local stress and strain levels. The apparent differences observed in the macroscopic test results are primarily an artifact of the non-uniform stress distribution caused by friction in the compression test setup, a factor that outweighs other contributions like crystallographic effects. This was further validated by creating a transformation map that reconciles the high local martensite fraction at the center (from EBSD) with the lower average bulk fraction (from XRD).

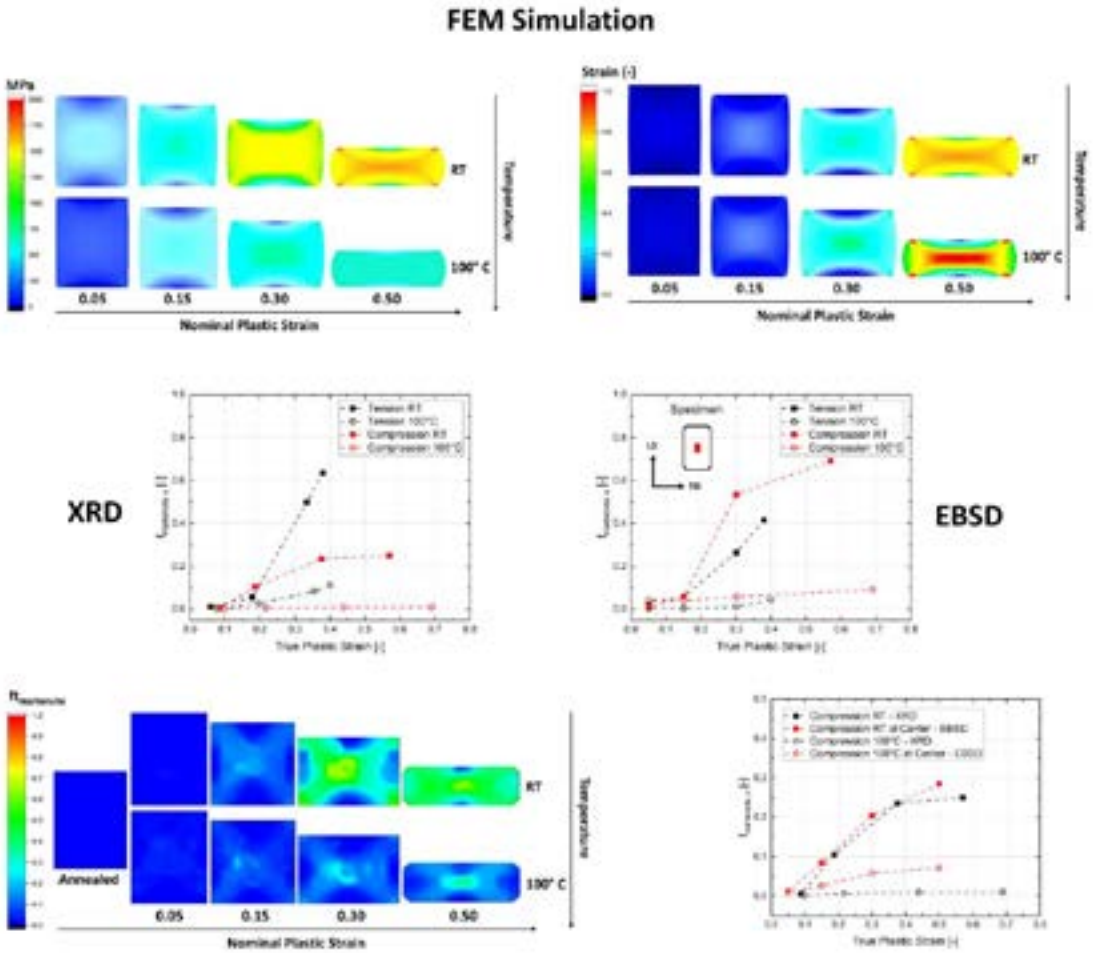


Figure 4: Stress and strain distribution in compression tests estimated by FEM computer simulation. Evolution of α' martensite transformed in tension and compression tests estimated by ex-situ XRD and EBSD analyses. Transformation probability map for the compression tests and evolution of α' martensite transformed in tension and compression tests estimated by XRD (all area) and EBSD (Center);

4. CONCLUSIONS

In this work, the TRIP effect in 201LN austenitic stainless steel was analyzed under both tensile and compressive loading conditions.

Due to the strain heterogeneity caused by friction, there was a significant discrepancy between the measured values of transformed martensite for the two loading conditions. For compression, ex-situ X- ray diffraction measurements resulted in lower amounts of transformed martensite than the EBSD measurements obtained at the center of the specimens. The values obtained in a larger area (X-ray) were lower in compression than in tension, while the EBSD measurements yielded the opposite results.

FEM simulation results and hardness measurements revealed that tension and strain values varied along the compression axis, requiring corrections to the stress and strain data. The fraction of transformed martensite was correlated with the local stress-strain curves. The estimated phase transformation map confirmed that the transformed martensite fraction was consistent with the XRD measurements.

ACKNOWLEDGMENT

This study was financed in part by the São Paulo Research Foundation (FAPESP Grant Nrs. 2019/07178–6, 2022/03139–9, 2023/ 03242–7 and 24/13959-9). Additionally, we extend our gratitude to the Brazilian research-funding agency CNPq (National Council for Scientific and Technological Development, Grant Nos. 407624/2022–8 and 315903/2023–6) for their financial support.

We also acknowledge Deakin University's Advanced Characterisation Facility for providing access to the EBSD instruments.

REFERENCES

[1] LU, J., et al. Stacking Fault Energies in Austenitic Stainless Steels. Acta Mater., V.111, p.39-46, 2016.

[2] KIM, J.K. AND DE COOMAN, B.C. Stacking Fault Energy and Deformation Mechanisms in Fe-xMn-0.6C-yAl TWIP Steel. Mater. Sci. Eng. A, V.676, p.216-231, 2016.

[3] GALINDO-NAVA, E.I. AND RIVERA-DÍAZ-DEL-CASTILLO, P.E.J. Understanding Martensite and Twin Formation in Austenitic Steels: A Model Describing TRIP and TWIP Effects. Acta Mater., V.128, p.120-134, 2017.

[4] CURTZE, S., et al. Thermodynamic Modeling of the Stacking Fault Energy of Austenitic Steels. Acta Mater., V.59, p.1068-1076, 2011.

[5] TALONEN, J. AND HÄNNINEN, H. Formation of Shear Bands and Strain-Induced Martensite During Plastic Deformation of Metastable Austenitic Stainless Steels. Acta Mater., V.55, p.6108-6118, 2007.

[6] TILAK KUMAR, J.V., et al. Influence of Strain Rate and Strain at Temperature on TRIP Effect in a Metastable Austenitic Stainless Steel. Mater. Sci. Eng. A, V.777, p.139046, 2020.

[7] KIM, H., et al. Experiment and Modeling to Investigate the Effect of Stress State, Strain and Temperature on Martensitic Phase Transformation in TRIP-Assisted Steel. Acta Mater., V.97, p.435-444, 2015.

[8] TALONEN, J., et al. Effect of Strain Rate on the Strain-Induced γ → α′-Martensite Transformation and Mechanical Properties of Austenitic Stainless Steels. Metall Mater Trans A, V.36, p.421-432, 2005.

[9] IWAMOTO, T., TSUTA, T. AND TOMITA, Y. *Investigation on Deformation Mode Dependence of Strain-Induced Martensitic Transformation in TRIP Steels and Modelling of Transformation Kinetics.* International Journal of Mechanical Sciences, V.40, p.173-182, 1998.

[10] LICHTENFELD, J.A., VAN TYNE, C.J. AND MATAYA, M.C. *Effect of Strain Rate on Stress-Strain Behavior of Alloy 309 And 304L Austenitic Stainless Steel*. Metall Mater Trans A, V.37, p.147-161, 2006.

[11] ALLAIN, S., et al. Correlations Between the Calculated Stacking Fault Energy and the Plasticity Mechanisms in Fe–Mn–C Alloys. Mater. Sci. Eng. A, V.387-389, p.158-162, 2004.

[12] Powell, G.W., Marshall, E.R. and Backofen, W.A. *Strain Hardening of Austenitic Stainless Steel.* ASM Transactions Quarterly, V.50, p.478-479, 1958.

[13] OKUTANI, T., YUKAWA, N. AND ISHIKAWA, K. *The Strain-Induced Martensitic Transformation of SUS304 Under Various Stress States.* Proceedings of the Japanese Society Technical Plasticity, V.95, p.331-332, 1995.

[14] MOHAMMADZADEH, R. *Deformation Characteristics of Nanocrystalline TWIP Steel Under Uniaxial Tension and Compression*. Mechanics of Materials, V.138, p.103147, 2019.

[15] LLOYD, J.T., FIELD, D.M. AND LIMMER, K.R. *A Four Parameter Hardening Model for TWIP and TRIP Steels. Materials & Design*, V.194, p.108878, 2020.

[16] PIERCE, D.T., et al. The Influence of Stacking Fault Energy on the Microstructural and Strain-Hardening Evolution of Fe–Mn–Al–Si Steels During Tensile Deformation. Acta Mater., V.100, p.178-190, 2015.

[17] MERIC DE BELLEFON, G., VAN DUYSEN, J.C. AND SRIDHARAN, K. *Composition-Dependence of Stacking Fault Energy in Austenitic Stainless Steels Through Linear Regression with Random Intercepts*. J. Nucl. Mater., V.492, p.227-230, 2017.

[18] MECKING, H. AND KOCKS, U.F. *Kinetics of Flow and Strain-Hardening*. Acta Metal. Mater., V.29, p.1865-1875, 1981

44º SENAFOR

28th International Forging Conference
27th National Sheet Metal Forming Conference / 14th International Sheet Metal Forming Conference / 11th BrDDRG Congress
14th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies – Brazil/RS
3ndInternational Conference on Innovation in Materials and Manufacturing
Hotel Plaza São Rafael – P. Alegre RS, October 2-4, 2024

DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA DE CORTE DE ALTA PERFORMANCE COMBINANDO AS TÉCNICAS DE METALURGIA DO PÓ E CANISTER DAMASCUS

Airton Rodrigues da Rosa [1]
Diego Pacheco Wermuth [2]
André Rosiak [3]
Lirio Schaeffer [4]

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo o aprimoramento de ferramentas de corte utilizadas na gastronomia, com foco na retenção da borda afiada e na resistência à oxidação, causada tanto por ácidos presentes nos alimentos quanto por fatores ambientais, como umidade e intempéries. Através da combinação de técnicas de metalurgia do pó e Canister Damascus (Damasco em Caixa), foi possível unir diferentes pós de aço, com propriedades completamente distintas em áreas específicas da peça. A periferia da ferramenta foi composta inteiramente por SAE 316L, material conhecido por sua excelente resistência à corrosão em ambientes agressivos. Já o núcleo da lâmina, na região da borda afiada, foi formado por uma liga contendo 96,5% de SAE 1095 e 3,5% de carbeto de tungstênio. Essa composição permite que os carbetos atuem como pequenos dentes extremamente duros no micro serrilhado do fio, prolongando a vida útil da afiação. O processo de caracterização das amostras incluiu análises metalográficas, microscopia eletrônica de varredura (MEV), ensaios de dureza e testes de retenção da borda afiada. Com isso, a combinação de metalurgia do pó e técnicas de Damasco em Caixa se mostrou uma abordagem eficaz, destacando-se como uma área promissora para o desenvolvimento de ferramentas de corte com diferentes ligas e propriedades otimizadas.
Palavras-chave: Metalurgia do Pó, Canister Damascus, Cutelaria.

1. INTRODUÇÃO

O setor de cutelaria no Brasil tem significativa relevância econômica, com aproximadamente 1.217 empresas dedicadas à fabricação de artigos do segmento, sendo a produção de facas o principal foco dessas indústrias [1]. Grande parte dessas empresas está concentrada no estado do Rio Grande do Sul, região reconhecida pela tradição metalúrgica. No entanto, globalmente, a excelência no desenvolvimento de facas remonta a localidades como Sakai, no Japão, que, desde 500 d.C., se destaca pela maestria de seus ferreiros e pela produção de lâminas de alta qualidade, utilizadas principalmente na gastronomia de prestígio mundial [2].

A demanda por facas com desempenho superior é crescente, especialmente em restaurantes de alta gastronomia, onde chefes de cozinha exigem ferramentas que apresentem alta resistência mecânica, durabilidade e retenção de fio. Essas facas, geralmente confeccionadas em aços ferramenta, devem atender a rigorosos critérios de qualidade, como dureza elevada, entre 53 e 63 HRC, facilidade de afiação e boa resistência à corrosão, mesmo quando submetidas a condições adversas no preparo de alimentos. Em alguns casos, facas de aço carbono são preferidas para manter a tradição, embora apresentem desafios em termos de resistência à oxidação [3].

Diante desse contexto, este trabalho propõe o desenvolvimento de uma liga metálica pré-formada utilizando a combinação das técnicas de metalurgia do pó e Canister Damascus, ou damasco em caixa, visando aprimorar as propriedades das facas de corte manual. A solução proposta busca não apenas aumentar a resistência ao desgaste e à corrosão, mas também prolongar o tempo de uso sem a necessidade frequente de afiação, atendendo às exigências mecânicas e químicas específicas desse tipo de ferramenta. A relevância deste estudo reside no potencial de inovação para a indústria de cutelaria nacional, proporcionando alternativas mais eficientes e sustentáveis em termos de produção, ao mesmo tempo em que oferece aos profissionais da gastronomia uma ferramenta de trabalho superior e de maior durabilidade.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização deste estudo, foram produzidas amostras de damasco em caixa em formato cúbico, com arestas de 50 mm, utilizando aço SAE 1010 como estrutura de suporte (Fgura 1). As amostras foram divididas em três partes principais: a liga da borda afiada, o revestimento e um divisor. A borda afiada foi composta por uma liga de SAE 1095, contendo 96,5% de Ferro (Fe) e 0,95% de Carbono (C), com a adição de 3,5% de Carbeto de Tungstênio, visando aumentar a dureza e a resistência ao desgaste.

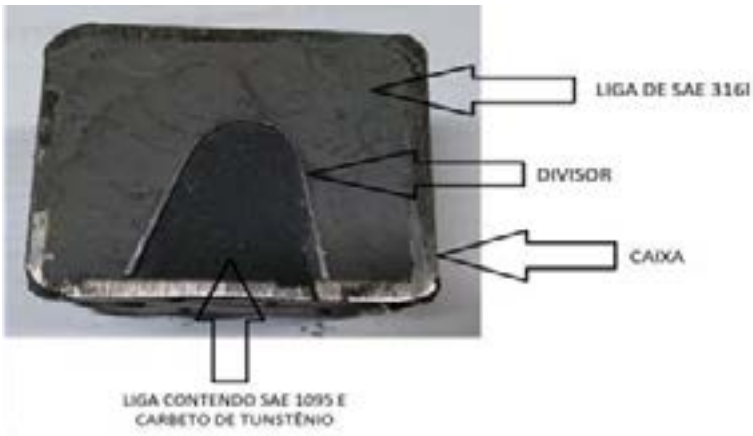


Figura 1 Caixa de damasco com o preenchimento de pós metálicos.

O revestimento externo da amostra foi fabricado inteiramente com aço inoxidável SAE 316L, escolhido por sua resistência à corrosão e durabilidade. Entre essas duas ligas, foi inserido um divisor de aço SAE 1010, cuja função inicial é garantir a separação das ligas durante o processo de sinterização, evitando a contaminação por carbono no SAE 316L. Adicionalmente, o divisor contribui para uma transição mais suave entre as ligas, minimizando as tensões mecânicas e garantindo a integridade estrutural da peça durante o processo de fabricação e uso.

A porção externa da lâmina, que compõe a superfície do damasco em caixa, será fabricada com pó de aço inoxidável 316L. A composição desse material inclui Ferro (Fe) como metal base, Carbono (C) em aproximadamente 0,011%, Cromo (Cr) em torno de 12,6%, Molibdênio (Mo) com 1,51%, Níquel (Ni) em 9,24%, Alumínio (Al) em 1,47%, Silício (Si) com cerca de 0,15%, além de outros elementos residuais. A porção interna da lâmina, correspondente à borda afiada, será composta por uma liga à base de pó de aço SAE 1095, contendo 96,5% de Ferro (Fe) e 0,95% de Carbono (C), com elementos residuais. Além disso, será adicionada uma fração de 3,5% de Carbeto de Tungstênio à liga, com o objetivo de aumentar a dureza e a retenção de fio da borda.

O pó da liga da borda afiada foi introduzido em um misturador adaptado, sendo rotacionado a uma velocidade de 120 rpm por meio de um torno disponível no Laboratório de Usinagem do IFSul campus Sapucaia do Sul. Essa operação teve duração de 24 horas, visando alcançar a homogeneização da liga.

A compactação das amostras será realizada por meio da aplicação de uma força uniaxial utilizando uma prensa hidráulica Bovenau P10ton, que possui capacidade máxima de 10 toneladas. Essa força será aplicada uniformemente sobre a mistura de pó metálico em toda a área interna da caixa, garantindo a compactação adequada tanto do aço inoxidável SAE 316L quanto da liga proposta para a borda afiada.

O molde utilizado para a compressão das amostras foi constituído por uma matriz de aço ferramenta AISI D2, que passou por processos de têmpera e revenimento para garantir a resistência necessária à operação. A matriz foi projetada especificamente de acordo com o desenho da caixa e incluía um punção superior para a aplicação uniforme da força durante o processo de compactação.

Oito amostras foram selecionadas para análise. Inicialmente, elas passaram por retificação em uma retificadora plana de precisão (modelo P58, marca Mello) e, em seguida, preparadas por técnicas convencionais de metalografia. Já polidas, as amostras foram limpas e submetidas a ataque químico com Nital por 2 segundos, neutralizadas, secas e limpas para remover resíduos. As amostras foram então analisadas metalograficamente com um microscópio óptico (MO), equipado com câmera, permitindo a visualização tanto ocular quanto em tela. Para medição de dureza foi usado o durometro EW-300SG, marca Alfa Mirage, disponibilizado pelo IFSul, campus Sapucaia do Sul. Para obter informações mais detalhadas, a análise também foi conduzida por Microscopia Eletrônica de Varredura associada à espectroscopia de energia dispersiva (MEV-EDS), com aproximações de 500x para comparação morfológica e de 1500x para o mapeamento por Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS).

Para avaliar a qualidade e durabilidade da borda afiada da liga proposta, foi realizada uma análise comparativa das micro serrilhas do gume, utilizando um microscópio óptico com objetiva de 20x. A comparação será feita entre uma lâmina construída com a liga proposta e outra em aço SAE 1095 laminado comercial. Ambas as lâminas serão afiadas com pedra artificial de grão 4000.

As lâminas foram submetidas a até 15000 cortes, ou quantos forem possíveis, em folhas de papel A4 (75g/m²). Após o teste, as bordas das facas serão novamente observadas no microscópio óptico, a fim de avaliar a variação do desgaste nas micro

serrilhas. Com essa análise, será possível determinar se a liga proposta oferece uma retenção de fio superior à do aço laminado comercial.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram produzidos dois damascos em caixa, e de cada um foram retiradas quatro amostras de diferentes regiões, totalizando oito amostras para o estudo. Cada amostra possui dimensões de 17 mm de largura, 37 mm de altura e 10 mm de espessura, conforme ilustrado na Figura 2. Essas amostras foram selecionadas estrategicamente para garantir a representatividade e a consistência das análises nas diferentes áreas do material.

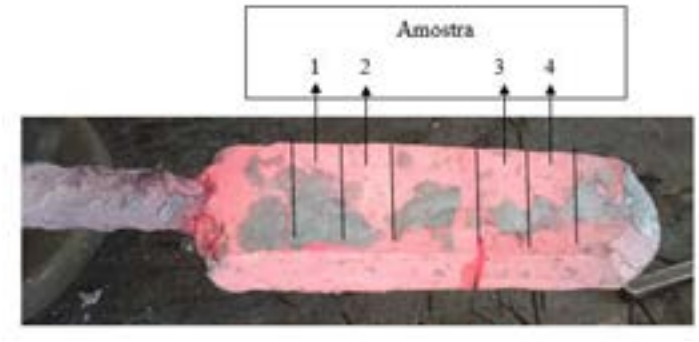


Figura 2 Ponto de retirada das amostras.

A micrografia apresentada na Figura 3 mostra a distribuição homogênea do carbetos de tungstênio (WC) na matriz de aço SAE 1095, que não passou por tratamento térmico de têmpera. Essa uniformidade na dispersão do WC é essencial para garantir as propriedades desejadas, como a resistência ao desgaste e a durabilidade da borda afiada.

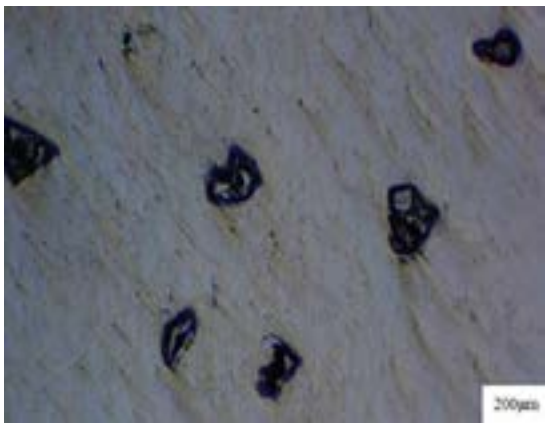


Figura 3 Distribuição de carbetos de tungstênio (WC) na matriz de aço SAE 1095.

As análises obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura (Figura 4) evidenciaram a ausência de porosidade na matriz de aço SAE 1095, indicando uma estrutura densa e bem consolidada. Além disso, foi possível observar o delineamento dos grãos de carbeto de tungstênio (WC), que estão perfeitamente integrados à matriz metálica. Essa ligação firme entre o carbeto e o metal base é um fator crucial, pois contribui diretamente para as propriedades finais do material, promovendo maior resistência ao desgaste por abrasão, especialmente na borda afiada, onde a retenção de fio é essencial.

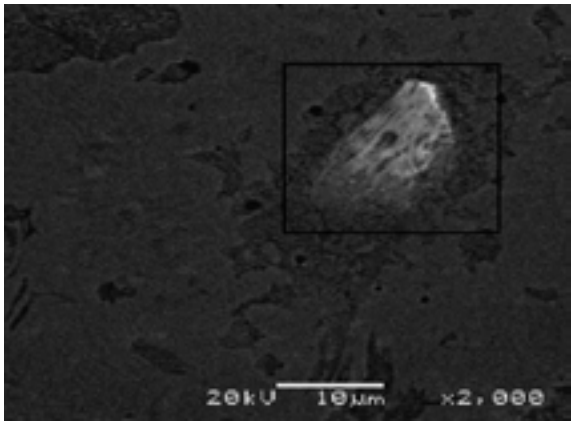


Figura 4 Caracterização por MEV. Carbeto de tungstênio (WC) em destaque.

A análise de dureza da borda afiada em aço SAE 1095 e da liga proposta, após o tratamento térmico de têmpera a 845°C com resfriamento em óleo e revenido em um ciclo a 200°C por 1 hora, resultou nos resultados apresentados da Tabela 1. Os resultados demonstram que as médias gerais de dureza mantiveram-se consistentes, com uma variação de apenas 1,1 HRC para mais ou para menos, indicando uma uniformidade nas propriedades mecânicas após o tratamento térmico.

Tabela 1 Medições de dureza borda afiados em aço SAE 1095.

DUREZA (HRc)							
AMOSTRA	**MEDIÇÃO 1**	**MEDIÇÃO 2**	**MEDIÇÃO 3**	**MEDIÇÃO 4**	**MEDIÇÃO 5**	**MEDIÇÃO 6**	**MÉDIA**
A1	57	57	57,5	58	58,5	59	**57,8**
A2	58	59	59	59,5	59,5	61	**59,3**
A3	58,5	59	59	59,5	60	60	**59,3**
A4	58	58	59,5	59,5	60	59,5	**59,1**
B1	59	59	59,5	60	61	61,5	**60,0**
B2	58,5	58,5	59,5	59	60	60,5	**59,3**
B3	59	59,5	59,5	60	60	61	**59,8**
B4	59	59	60	60	60	60	**59,7**
			MÉDIA TOTAL				**59,3**

De acordo com a Wüsthof, uma das mais renomadas fabricantes mundiais de facas de alta performance para gastronomia, fundada há mais de 200 anos na região de Solingen, Alemanha, a dureza ideal para facas de cozinha de alta qualidade gira em torno de 58 HRC. Esse nível de dureza é considerado ideal porque proporciona um equilíbrio entre facilidade de afiação e excelente retenção do fio da lâmina, características essenciais para o desempenho em ambientes culinários exigentes [4]

A análise dos resultados de dureza apresentados na tabela revela uma variação relativamente pequena entre as diferentes amostras, com valores de dureza (HRC) variando de 57 a 61. A média geral de dureza das amostras é de 59,3 HRC, um valor que se aproxima da dureza considerada ideal para facas de cozinha de alta performance, que é de 58 HRC, conforme indicado pela Wüsthof.

Especificamente, as amostras do grupo A (A1, A2, A3, A4) apresentam uma média de dureza variando entre 57,8 e 59,3 HRC, mostrando boa consistência, com

variações mínimas. As amostras do grupo B (B1, B2, B3, B4) mostram uma dureza ligeiramente superior, com médias variando de 59,3 a 60,0 HRC, o que sugere uma leve vantagem em termos de retenção de fio e resistência ao desgaste.

As medições indicam que as amostras estão dentro de um intervalo aceitável de dureza para facas de cozinha, sendo compatíveis com as expectativas de desempenho mecânico. Embora algumas amostras apresentem valores ligeiramente acima de 60 HRC, o que pode aumentar a retenção de fio, isso também pode tornar a afiação mais desafiadora. No geral, os resultados indicam que as amostras atingem um bom equilíbrio entre durabilidade e facilidade de manutenção, o que é desejável para aplicações na cutelaria.

A análise de dureza do revestimento externo em aço SAE 316L, após o tratamento térmico de têmpera a 845°C com resfriamento em óleo e revenido a 200°C por 1 hora, resultou nos valores apresentados na Tabela 2. As medições realizadas nos pontos previamente estabelecidos mostraram uma constância na dureza, com variação máxima de 2,85 HB para mais ou para menos.

Tabela 2 Medições de dureza revestimento externo em aço SAE 316l.

DUREZA (HB)					
AMOSTRA	**MEDIÇÃO 1**	**MEDIÇÃO 2**	**MEDIÇÃO 3**	**MEDIÇÃO 4**	**MÉDIA**
A1	175	177	179	179	**177,5**
A2	177	177	179	176	**177,3**
A3	171	175	177	177	**175,0**
A4	170	170	172	173	**171,3**
B1	172	174	175	175	**174,0**
B2	176	177	175	172	**175,0**
B3	176	174	175	178	**175,8**
B4	171	173	172	171	**171,8**
			MÉDIA TOTAL		**174,7**

Essa variação limitada indica uma boa uniformidade nas propriedades mecânicas do revestimento, o que é desejável para garantir a integridade do material em aplicações que exigem resistência à corrosão e desgaste. A homogeneidade nos resultados também sugere que o tratamento térmico foi eficaz na estabilização das propriedades do aço SAE 316L, preservando sua resistência e durabilidade, características essenciais para garantir a proteção da borda afiada e a longevidade da ferramenta. A dureza do aço SAE 316L foi elevada devido ao processo de damasco em caixa, que envolve forjamento, mas praticamente não sofreu alterações significativas com o tratamento térmico, uma vez que se trata de um aço não temperável.

As amostras apresentadas na figuras 5, 6, 7 e 8 foram analisadas utilizando um microscópio óptico com uma objetiva de 20x. O objetivo da análise foi comparar as micro serrilhas formadas na borda afiada de duas lâminas: uma construída com a liga proposta, contendo aço SAE 1095 e carbeto de tungstênio, e outra feita de aço SAE 1095 laminado comercial. Ambas as lâminas foram forjadas e construídas com angulação de 20°, e afiadas manualmente em pedra artificial de grão 4000. O método de afiação manual foi utilizado para evitar o superaquecimento do gume, preservando assim a integridade das micro serrilhas e garantindo uma comparação precisa entre as

lâminas.

Figura 5 Micro serrilhado do fio de uma faca em aço SAE 1095 laminado comercial, na sua condição inicial.

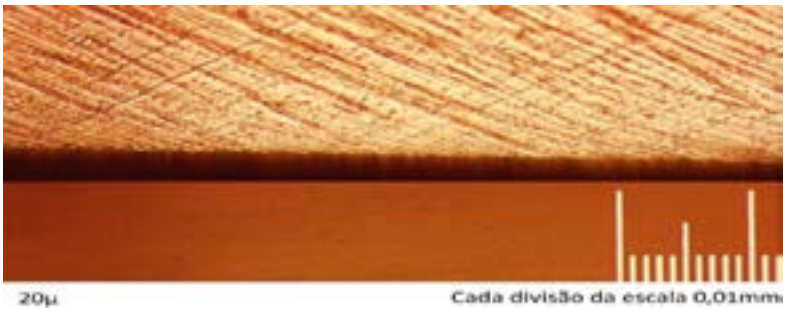


Figura 6 Micro serrilhado do fio de uma faca em aço SAE 1095 laminado comercial, na sua condição após ensaio com 9000 cortes.

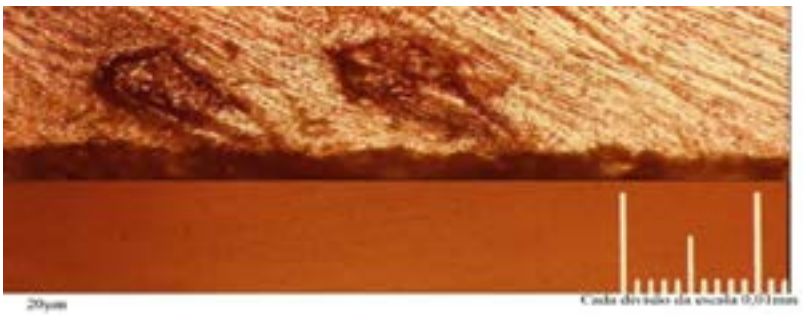


Figura 7 Micro serrilhado do fio de uma faca em aço liga proposta contendo SAE 1095 e carbeto de tungstênio, na sua condição inicial.

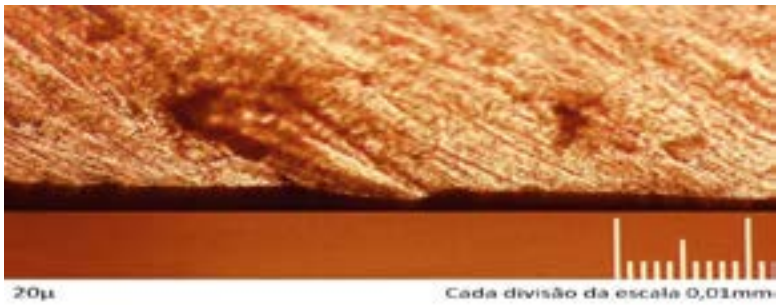


Figura 8 Micro serrilhado do fio de uma faca em aço liga proposta contendo SAE 1095 e carbeto de tungstênio, na sua condição após ensaio com 9000 cortes.

As imagens do microserrilhado no fio de corte de ambas as lâminas, tanto no estado inicial quanto após o desgaste até a perda completa do fio, revelaram diferenças significativas. A lâmina de aço SAE 1095 laminado comercial apresentou

um desgaste mais uniforme, com o gume praticamente sem serrilhado após o ensaio que simulou 9.000 cortes. Em contraste, a lâmina fabricada com a liga proposta, contendo carbeto de tungstênio, exibiu menor desgaste, com os carbetos permanecendo quase intactos, o que preservou o serrilhado e prolongou a vida útil da afiação. Essa lâmina foi capaz de realizar 10.350 cortes antes de perder o fio, evidenciando a superioridade da liga proposta em termos de resistência ao desgaste e retenção de corte. A Figura 9 mostra a faca desenvolvida a partir da liga metálica proposta, utilizada para os testes descritos.

Figura 9 Faca em aço liga proposta contendo SAE 1095 e carbeto de tungstênio na parte do gume e SAE 316L na parte externa.

4. CONCLUSÕES

O presente estudo demonstrou que a combinação das técnicas de metalurgia do pó e Canister Damascus (damasco em caixa) oferece uma abordagem eficiente para a produção de ferramentas de corte de alta performance, especialmente para o setor gastronômico. As análises realizadas, tanto metalográficas quanto mecânicas, indicaram que a liga proposta, composta por aço SAE 1095 com 3,5% de carbeto de tungstênio, apresentou uma retenção de fio significativamente superior à do aço SAE 1095 laminado comercial. A presença de carbetos de tungstênio, que atuam como micro serrilhas no fio de corte, proporcionou maior resistência ao desgaste, permitindo que a lâmina desenvolvida mantivesse sua afiação por mais tempo, com desempenho superior em ensaios de corte.

O revestimento de aço inoxidável SAE 316L, utilizado na parte externa da lâmina, tem potencial para proteger contra a corrosão, garantindo assim a durabilidade da ferramenta em ambientes agressivos, como aqueles expostos a umidade e ácidos presentes nos alimentos. O tratamento térmico aplicado, embora tenha pouco efeito no aumento da dureza do SAE 316L, contribuiu para a estabilidade e homogeneidade das propriedades mecânicas do material, consolidando sua função de proteção.

Com base nos resultados de dureza, microestrutura e testes de corte, conclui-se que a liga proposta, ao combinar resistência ao desgaste, retenção de fio e proteção contra corrosão, é uma solução promissora para o desenvolvimento de facas de alto desempenho na indústria de cutelaria. A técnica de damasco em caixa, aliada ao uso de materiais estratégicos como o carbeto de tungstênio, oferece um avanço significativo em relação às ligas convencionais, com potencial para aplicação industrial e artesanal, elevando o padrão de qualidade das ferramentas de corte utilizadas na gastronomia.

REFERÊNCIAS

[1] https://www.econodata.com.br/empresas/todo-brasil/fabricacao-de-artigos-de-cutelaria-de-serralheria-e-ferramentas-c-254

[2] JapaneseKitchenKnives: EssentialTechniquesandRecipes Hiromitsunozaki, kateklippensteen, yasuo konichi 25, janeiro 2013

[3] EDGE IN THE KITCHEN: The UltimateGuidetoKitchenKnives—HowtoBuyThem, KeepThemRazor Sharp, and Use ThemLike a Pro – 10 junho 2008por Chad Ward , Bryan Regan

[4] WUSTHOF. Disponível em: https://www.wusthof.com.br/chef/wusthof-classic-4582-20/

[5] MARTINS, V. Utilização do processo de moldagem por injeção de pós metálicos nanométricos (MIM) para o desenvolvimento de rotor e estator em servomotor aplicado à área médica. 2015. 294 p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015

[6] ROSIAK, ANDRÉ ; WERMUTH, DIEGO PACHECO ; COSTA, LUANA DE LUCCA DE ; SILVA, LETÍCIA DUPONT ; SCHAEFFER, LIRIO . PROCESSO DE SINTERFORJAMENTO: UMA REVISÃO. In: 74 Congresso Anual da ABM, 2019, São Paulo. ABM Proceedings, 2019. p. 1961.

[7] Schaeffer, L; Forjamento:Tecnologia do processo. 2ª edição. Impressa Livre editora, Porto Alegre, 2023

44º SENAFOR
28ª Conferência Internacional de Forjamento - Brasil
14ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas / 11º Congresso do BrDDRG
14ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis
3ª Conferência Internacional de Inovação em Materiais e Manufatura
Porto Alegre, RS, dias 1, 2 e 3 de outubro de 2025
www.senafor.com

INFLUÊNCIA DA NANOALUMINA NAS PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DE PASTAS DE CIMENTO CLASSE G PARA POÇOS DE PETRÓLEO DESTINADAS AO ARMAZENAMENTO GEOLÓGICO DE CARBONO

Caroline Brune [1]
Giovanni dos Santos Batista [2]
Eleani Maria da Costa [3]

RESUMO

O comportamento de pastas de cimento classe G para poços de petróleo após a adição de nanoalumina - n-Al_2O_3 (0,5; 1; 1,5 e 2% em peso) foi investigado. Os corpos de prova foram curados em autoclave, com pressão de 40 bar e temperatura de 60 °C durante 24 horas. Após esse período, os corpos de prova seguiram imersos em água e pressão atmosférica por 21 e 90 dias. Os efeitos do n-Al_2O_3 foram avaliados por espalhamento do tronco de cone, volume e tamanho de poros, difração de raios X e análise termogravimétrica. Foi observada a redução do diâmetro de espalhamento com a adição de n-Al_2O_3 devido a sua alta área superficial, aumentando a demanda de água. Além disso, o volume de poros determinado por Brunauer-Emmet-Teller (BET), não demonstrou variação significativa para a idade de 21 dias. Aos 90 dias, houve um pequeno acréscimo quando comparado aos 21 dias devido à lixiviação e maior formação de C-S-H devido ao longo período de cura. Ainda, a adição de n-Al_2O_3 contribuiu para redução da porosidade em 90 dias. Na análise por difração de raios X para a idade de 21 dias, nas amostras contendo n-Al_2O_3 os picos de portlandita apresentaram uma menor intensidade em comparação com a amostra referência, indicando reação pozolânica. Além disso, o grau de hidratação aumentou em presença de n-Al_2O_3. Ambos os efeitos foram mais evidentes na idade de 90 dias. Na análise termogravimétrica foi possível observar um comportamento similar, onde o teor de portlandita pode ser quantificado. Em geral, a n-Al_2O_3 contribuiu para melhora das propriedades físico-químicas da pasta de cimento, indicando a viabilidade de sua aplicação em armazenamento geológico de carbono.

Palavras-chave – pasta de cimento classe G; reação pozolânica; hidratação

(1) Doutoranda, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS), Brasil.
(2) Dr., Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS), Brasil.
(3) Prof. Dr., Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS), Brasil.

INFLUENCE OF NANOALUMINA ON THE PHYSICO-CHEMICAL PROPERTIES OF CLASS G CEMENT PASTES FOR OIL WELLS APPLIED TO GEOLOGICAL CARBON STORAGE

ABSTRACT

The behavior of class G oil well cement pastes after the addition of nanoalumina – n-Al_2O_3 (0.5, 1, 1.5 and 2 wt%) was investigated. The specimens were cured in an autoclave under 40 bar pressure and 60 ºC for 24 hours. After this period, the specimens remained immersed in water at atmospheric pressure for 21 and 90 days. The effects of n-Al_2O_3 were evaluated by slump cone test, pore volume and size, X-ray diffraction and thermogravimetric analysis. A reduction in the spread diameter was observed with the addition of n-Al_2O_3 due to its high surface area, which increases water demand. Furthermore, the pore volume determined by the Brunauer-Emmer-Teller (BET) method did not show significant variation at 21 days. At 90 days, a slight increase was observed compared to 21 days, attributed to leaching and greater C-S-H formation due to the extended curing period. In addition, the incorporation of n-Al_2O_3 contributed to porosity reduction at 90 days. In the X-ray diffraction analysis at 21 days, the portlandite peaks in the samples containing n-Al_2O_3 showed lower intensity compared to the reference sample, indicating pozzolanic reaction. Moreover, the degree of hydration increased in the presence of n-Al_2O_3. Both effects were more evident in 90 days. Thermogravimetric analysis revealed a similar behavior, where the portlandite content could be quantified. Overall, n-Al_2O_3 contributed to the improvement of the physicochemical properties of the cement paste, indicating its potential for application in geological carbon storage.

Key words — class G cement paste, pozzolanic reaction, hydration.

1. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas, intensificadas pela ação humana, têm aumentado a ocorrência de eventos extremos, como secas, chuvas intensas e ondas de calor, afetando especialmente os que menos contribuem para o problema. O aquecimento global está diretamente relacionado as emissões de gases de efeito estufa, que seguem em crescimento devido ao uso insustentável de energia, mudanças no uso da terra e padrões de consumo [1]. Neste cenário, a captura e armazenamento geológico de carbono (CCS) se destaca como uma tecnologia estratégica para mitigar os impactos climáticos, pois permite a injeção de CO_2 em formações geológicas profundas e estáveis, reduzindo a sua concentração atmosférica [2].

A viabilidade do CCS depende da integridade dos poços que devem suportar

condições severas de temperatura, pressão e o contato prolongado com o CO_2 [3]. Neste contexto, a cimentação é um processo que tem como principal objetivo isolar o espaço entre a formação rochosa e a coluna de revestimento em aço que é adicionada no poço perfurado. Em caso de falhas neste processo, consequências catastróficas podem ocorrer, principalmente ambientais [4]. Portanto, a pasta de cimento deve ser deve capaz de suportar as mais altas pressões e resistir a ataques de fluidos corrosivos encontrados nestes espaços [5-6]. A migração de fluidos corrosivos através de poros e fissuras aumenta a permeabilidade e a porosidade da bainha de cimento, intensificando o processo de carbonatação e a degradação dos produtos hidratados, o que compromete suas propriedades ao longo do tempo [7].

Diversos estudos têm buscado soluções para mitigar a degradação da pasta de cimento em poços expostos às condições do armazenamento geológico de carbono [8-13]. E destaca-se a adição de nanomateriais, como SiO_2, Al_2O_3, TiO_2, Fe_2O_3, $CaCO_3$, ZnO_2 e nanoargilas, que contribuem para reduzir a permeabilidade e o teor de portlandita - $Ca(OH)_2$ - (CH), favorecendo a formação de cadeias de C-S-H mais densas. Esses efeitos resultam em maior resistência mecânica e melhoram o desempenho ao ataque do CO_2 [14-20].

A adição de nanoalumina (n-Al_2O_3) tem mostrado resultados promissores, favorecendo a formação de C–S–H, reduzindo a porosidade e melhorando as propriedades mecânicas [21-22-18]. Entretanto, ainda são limitados os estudos que avaliam a evolução química e microestrutural das pastas de cimento com a adição de nanoalumina e curados em condições de alta pressão e temperatura. Devido a isso, a presente pesquisa investiga o comportamento de hidratação e o desenvolvimento microestrutural do cimento classe G para poços de petróleo modificado com n-Al_2O_3 e curado sob condições de HPHT (*high pressure and high temperature*).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

O cimento utilizado neste estudo foi o cimento Portland classe G, fornecido pela CSN Brasil S.A. A nanoalumina (n-Al_2O_3) foi adquirida da Sigma-Aldrich na forma de pó, apresentando a fase gama. As propriedades do cimento e da nanopartícula estão apresentadas na Tabela 1. A composição química do cimento classe G, fornecida pelo fabricante está apresentado na Tabela 2.

Tabela 1: Propriedades da n-Al_2O_3 e do cimento classe G disponibilizadas pelos fornecedores.

Material	Tamanho de partícula	Densidade ($g.cm^{-3}$)	Área superficial específica ($m^2.g^{-1}$)
n-Al_2O_3	<50 nm	3,61	>40
Cimento classe G	8,52 µm *	3,16	0,70*

*Determinado pelo método Brunauer–Emmett–Teller (BET).

Tabela 2: Composição química do cimento classe G.

Óxido	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O	LOI[1]	IR[2]
%	21,3	3,8	4,6	64,4	1,3	2,6	0,2	0,4	0,8	0,6

[1] Perda por ignição. [2] Resíduo insolúvel.

2.2 Preparação das pastas de cimento

As pastas de cimento foram preparadas conforme a especificação 10A [23] do Instituto Americano do Petróleo (*American Petroleum Instituite* – API), a qual estabelece a relação água/cimento de 0,44. Para manter a massa total para cada uma das pastas de cimento, a adição de n-Al_2O_3 implicou na redução da quantidade de cimento e água, sendo então fixada a relação água/sólidos de 0,44. A Tabela 3 mostra a composição de cada uma das misturas. Para a produção das pastas de cimento, foi utilizado um mixer de velocidade constante, específico para cimento de poços de petróleo, Model 7000. O processo de preparação ocorreu em duas etapas. Primeiramente, a água necessária para a mistura foi adicionada no mixer e configurado a uma rotação de 4.000 rpm por 15s, nesta etapa ocorreu a adição do cimento. Na segunda etapa, a velocidade de rotação do mixer foi ajustada para 12.000 rpm durante 35s para uma completa homogeneização da pasta de cimento.

No caso das pastas contendo a n-Al_2O_3, o procedimento passou por uma etapa adicional. Antes da incorporação do cimento, as nanopartículas foram primeiramente dispersas com a utilização de um sonicador de ponteira já com a quantidade de água final para a mistura. A dispersão foi realizada em três ciclos de 1 minuto, intercalados por 1 minuto de pausa para evitar o aquecimento da solução [24]. A suspensão obtida após essa dispersão foi então utilizada para a mistura com o cimento, a partir daí, seguiu-se os mesmos procedimentos descritos anteriormente para a preparação das pastas de cimento.

Tabela 3: Composição das pastas de cimento.

Pasta de cimento	Cimento (g)	n-Al_2O_3 (g)	Água (mL)
REF	600	-	264,0
0,5% n-Al_2O_3	597	3	262,7
1,0% n-Al_2O_3	594	6	261,4
1,5% n-Al_2O_3	591	9	260
2,0% n-Al_2O_3	588	12	258,7

Após a preparação, os moldes (de 21,6 mm de diâmetro e 120 mm de altura) foram preenchidos em duas camadas, cada uma delas adensada com 10 golpes. Em seguida foram fechados e colocados no reator, imersos em água deionizada e submetidos a uma pressão de 4 MPa de dióxido de carbono (CO_2) e temperatura 60 ºC por 24 horas, condição que promove uma elevada hidratação em um curto período [25]. Então, os corpos de prova foram desmoldados, cortados e ajustados para a altura final de 43,2 mm, sendo posteriormente submetidos a cura adicional em água e pressão atmosférica por 21 e 90 dias.

2.3 Métodos de caracterização

Para determinação do diâmetro de espalhamento, utilizou-se um método proposto por Kantro [26], também conhecido como *mini slump*, o qual consiste em um tronco de cone cujas dimensões são padronizadas: 60 mm de altura, 40 mm de diâmetro inferior e 20 mm de diâmetro superior, posicionado sob um vidro liso, plano e nivelado. A pasta foi colocada no cone logo após a sua preparação e então o cone foi removido verticalmente. A leitura foi realizada após a completa estabilização da pasta e seis medidas do diâmetro espalhado foram realizadas. O diâmetro de espalhamento está associado a trabalhabilidade da pasta de cimento.

A análise pelo método de Brunauer-Emmett-Teller (BET) foi realizada para

quantificar volume e tamanho de poros nas pastas com a adição de n-Al_2O_3. Antes da análise, as amostras foram cortadas em pequenos pedaços e secas em estufa a vácuo a 60 °C por 7 dias para completa remoção da água. Em seguida, as amostras foram desgaseificadas com N_2 no equipamento FlowPrep 060 por 2 horas e analisadas no equipamento Tristar II Plus da Micromeritics, com gás N_2, vareta de adição e banho de nitrogênio (-195,85 °C).

Realizou-se a análise de difração de raios X (DRX) nas amostras para determinação dos produtos formados durante a hidratação da pasta de cimento e identificar as mudanças de composição à medida que a n-Al_2O_3 foi adicionada. Para a análise, o pó foi obtido pela moagem das amostras com um almofariz e pilão. O difratômetro utilizado foi o *Bruker D8 Advance*, com alvo de cobre (λ=1,54 Å), faixa de ângulo de Bragg 2θ de 10° a 60°, velocidade de 0,02°/s, operando a 40 kV e 30 mA.

A análise termogravimétrica (TGA) foi utilizada para estudar a decomposição térmica dos produtos de hidratação em função da temperatura e do tempo. Especificamente, foi empregada para quantificar o teor de CH presente nas amostras. Antes da análise, as amostras foram moídas manualmente usando um almofariz e pilão. A análise foi realizada utilizando o equipamento TA *Instruments* SDT 650, com gás N_2 e taxa de aquecimento de 10°C/min, no intervalo de 40 a 1000°C. A quantidade de CH presente em cada uma das pastas hidratadas foi determinada com base na curva termogravimétrica, especificamente na faixa de temperatura de 350-460 ºC, correspondente a decomposição da portlandita [27]. Nesta faixa de temperatura, ocorre a seguinte reação, representada pela Equação 1.

$$Ca(OH)_2 \xrightarrow{\Delta} CaO + H_2O \quad (1)$$

Como um mol de H_2O é liberado para cada mol de CH, a quantidade de CH presente na amostra foi calculada utilizando a Equação 2 [28].

$$CH_{(\%)} = \frac{M_{(CH)} \times PM_{(CH)}}{M_{(H_2O)}} \quad (2)$$

M_{CH} = massa molar do hidróxido de cálcio (74,09 g.mol^{-1})

M_{H2O} = massa molar da água (18,02 g.mol^{-1})

PM_{CH} = perda de massa de CH.

3. RESULTADOS

Os resultados do diâmetro de espalhamento, determinados por meio do ensaio *mini-slump*, estão apresentados na Figura 1. É possível observar que a adição de n-Al_2O_3 afetou negativamente a reologia da pasta de cimento, ocorrendo a redução do diâmetro de espalhamento. Em comparação a pasta referência, a adição de 0,5% de n-Al_2O_3 ocasionou a queda de 13,4% no diâmetro de espalhamento. Para os teores de 1,0%, 1,5% e 2,0%, as reduções foram de 21,4%, 26,8% e 35,4%, respectivamente, confirmando a tendência de diminuição à medida que a inclusão de nanopartículas

aumenta. Resultados semelhantes associadas a perda de fluidez em sistemas cimentícios contendo nanomateriais também foram reportados em outros estudos [29-30].

A redução observada no diâmetro de espalhamento das pastas pode ser atribuída a presença das nanopartículas, que favorecem a aglomeração dos produtos de hidratação e contribuem para o aprisionamento de água. Além disso, o aumento da área superficial específica intensifica a demanda por água para garantir uma fluidez adequada. Assim, quanto maior o teor de n-Al_2O_3 adicionado, a fluidez tende a ser menor, quando mantida a relação a/c constante [29-30].

Em situações reais de completação de poços de petróleo, essa perda na fluidez pode comprometer o desempenho da operação, elevando o risco de falhas no preenchimento do espaço anular. Contudo, na prática da indústria do petróleo, é comum o emprego de aditivos para ajustar a fluidez das pastas de cimento [31].

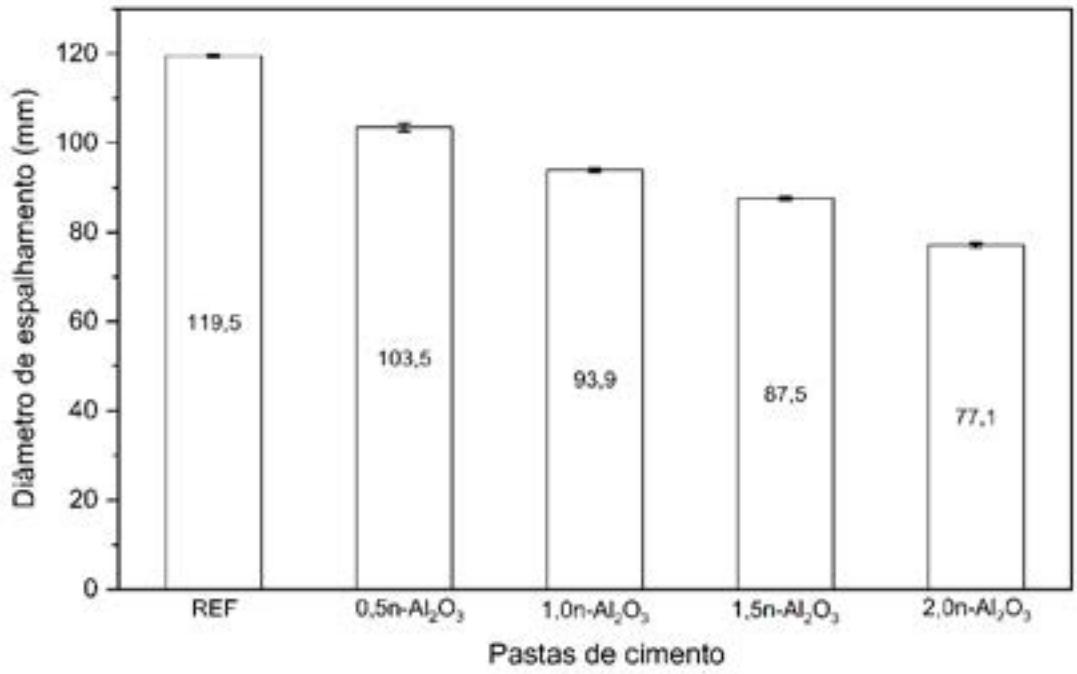


Figura 1: Diâmetro de espalhamento das pastas de cimento.

O volume total de poros após 21 e 90 dias de cura é apresentado na Figura 2. As amostras curadas por 21 dias apresentaram volume de poros relativamente próximos, variando de 0,0325 cm^3/g a 0,0419 cm^3/g. Já as amostras curadas por 90 dias apresentaram o maior volume de poros em comparação as amostras curadas por 21 dias. O aumento pode estar associado a lixiviação dos íons de cálcio (Ca^{2+}) da matriz cimentícia durante a exposição prolongada a água, promovendo a formação de poros adicionais. Além disso, a imersão por um período maior favorece a hidratação e consequentemente, o desenvolvimento dos produtos de hidratação, como o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e o silicato de cálcio e alumínio hidratado (C-A-S-H). Embora contribuam para a densificação da matriz cimentícia, essas fases também apresentam porosidade, o que pode resultar em um aumento do volume total de poros.

Entretanto, observa-se que a adição de n-Al_2O_3 favoreceu a densificação da matriz, evidenciada pela redução da porosidade. Aos 90 dias, o volume total de poros

da pasta de cimento referência foi de 0,0447 cm³/g, enquanto da amostra com 2% de n-Al_2O_3 foi de 0,0362 cm³/g (redução de 19%). Esse comportamento pode estar relacionado ao preenchimento de poros e ao refinamento da microestrutura, promovido pelo efeito pozolânico e aumento dos pontos de nucleação do C-S-H à medida que aumenta o teor de n-Al_2O_3.

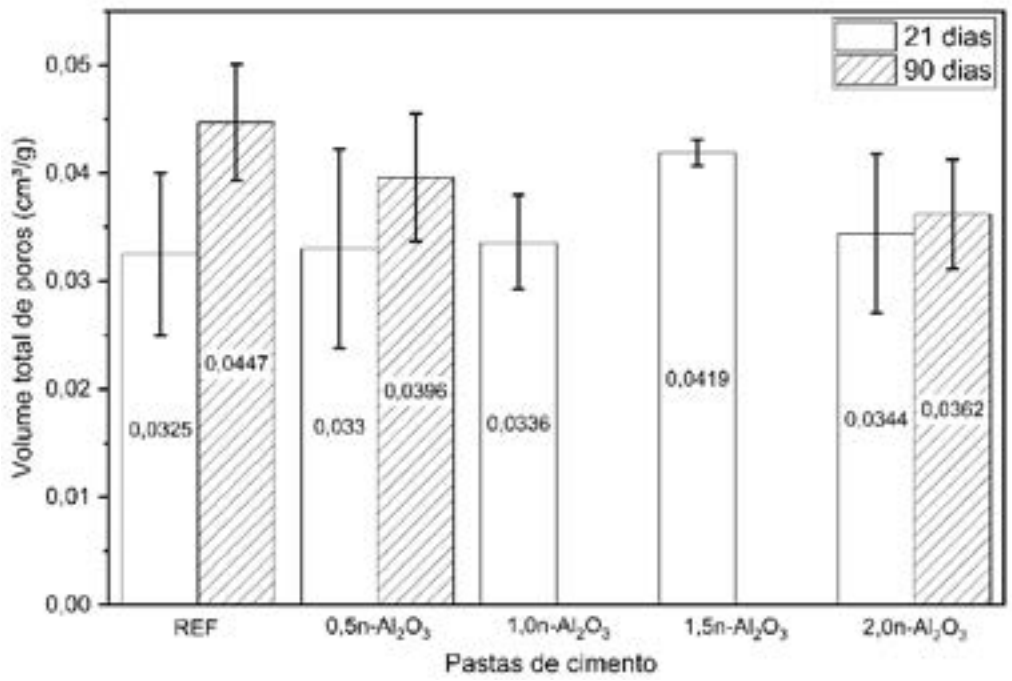


Figura 2: Volume de poros determinado por BET.

Os espectros de DRX das amostras após 21 dias são apresentados na Figura 3. Todas as pastas exibem picos característicos de CH, um dos principais produtos da hidratação do cimento. Entretanto, as amostras contendo n-Al_2O_3, os picos de difração aparecem com menor intensidade em relação a amostra referência. Esse comportamento sugere que a n-Al_2O_3 reage com o CH, consumindo-o por meio da reação pozolânica e, possivelmente, contribuindo para a formação de C-A-S-H. Além disso, observa-se a presença de picos correspondentes ao C_2S e C_3S, indicando que a hidratação não estava completa nesse período.

A Figura 4 apresenta os espectros de DRX após 90 dias. Em comparação com os resultados obtidos aos 21 dias, ainda são identificados picos correspondentes as fases de silicatos anidros. Contudo, na amostra com 2% de n-Al_2O_3, esses picos aparecem com menor intensidade, indicando um grau mais elevado de hidratação nessa composição. Observa-se a presença de picos de CH, embora com uma intensidade reduzida nas pastas contendo n-Al_2O_3, o que sugere a continuidade das reações pozolânicas e o consumo progressivo dessa fase. Esses resultados reforçam que a adição de n-Al_2O_3 pode modificar a cinética de hidratação e favorecer a formação de produtos cimentícios ao longo do tempo.

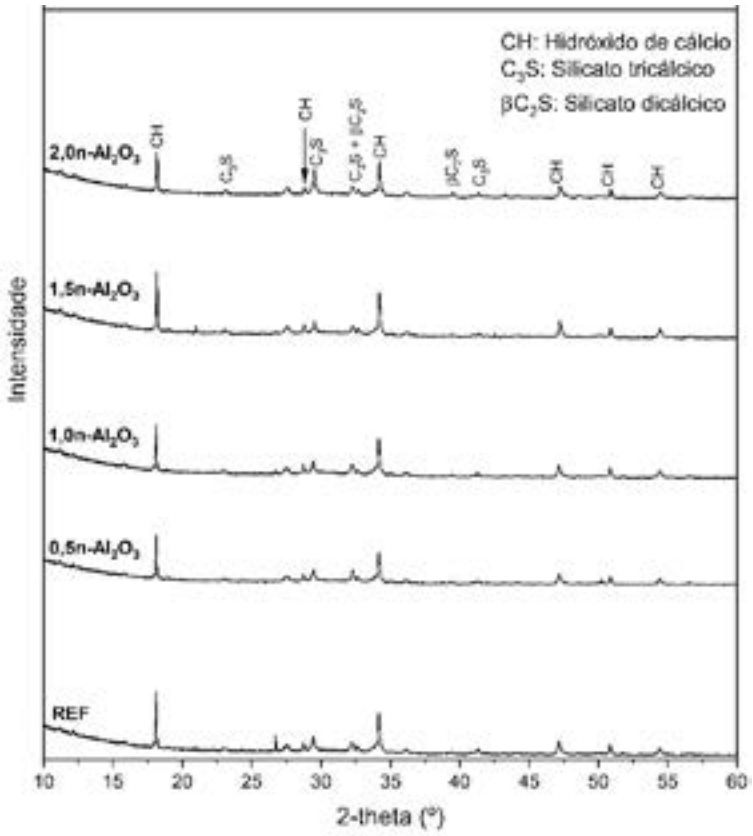


Figura 3: Espectro de DRX das pastas de cimento após 21 dias.

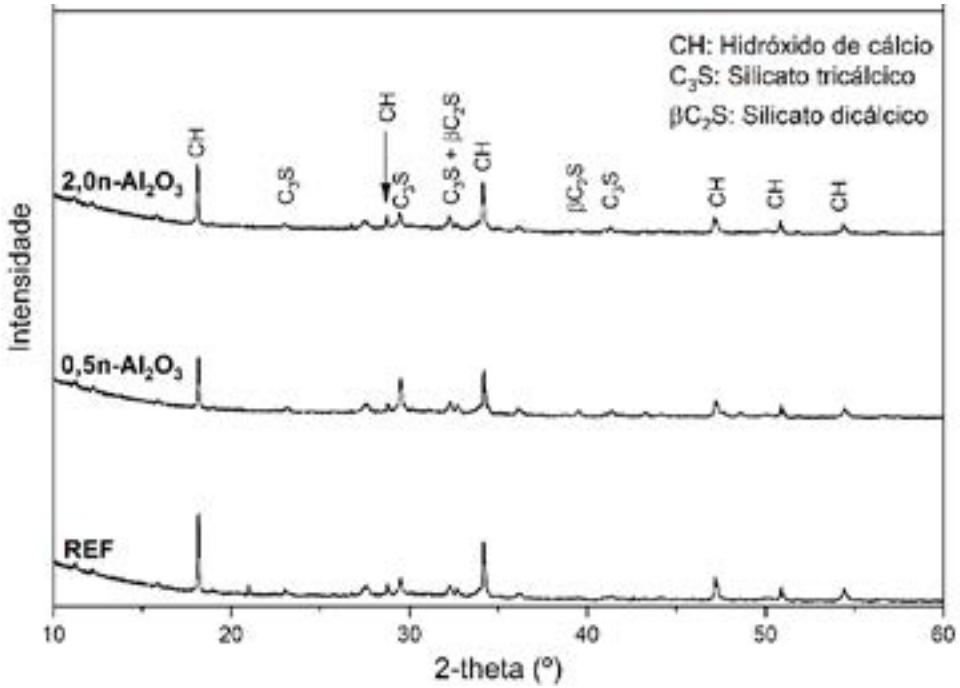


Figura 4: Espectro de DRX das pastas de cimento após 90 dias.

A Figura 5 apresenta o termograma das pastas de cimento após 21 dias. É possível observar que as amostras apresentam três regiões distintas de perda de massa. A primeira, localizada entre 100 e 125 ºC, resulta da desidratação de diversos

hidratos, como C-S-H, carboaluminatos e etringita, além da perda de água adsorvida [32]. A segunda região, observada entre 350 e 460 ºC, está relacionada a decomposição da portlandita [33-27]. Já a terceira região, ocorrendo em torno de 650 ºC, está associada a decomposição do carbonato de cálcio [32-34].

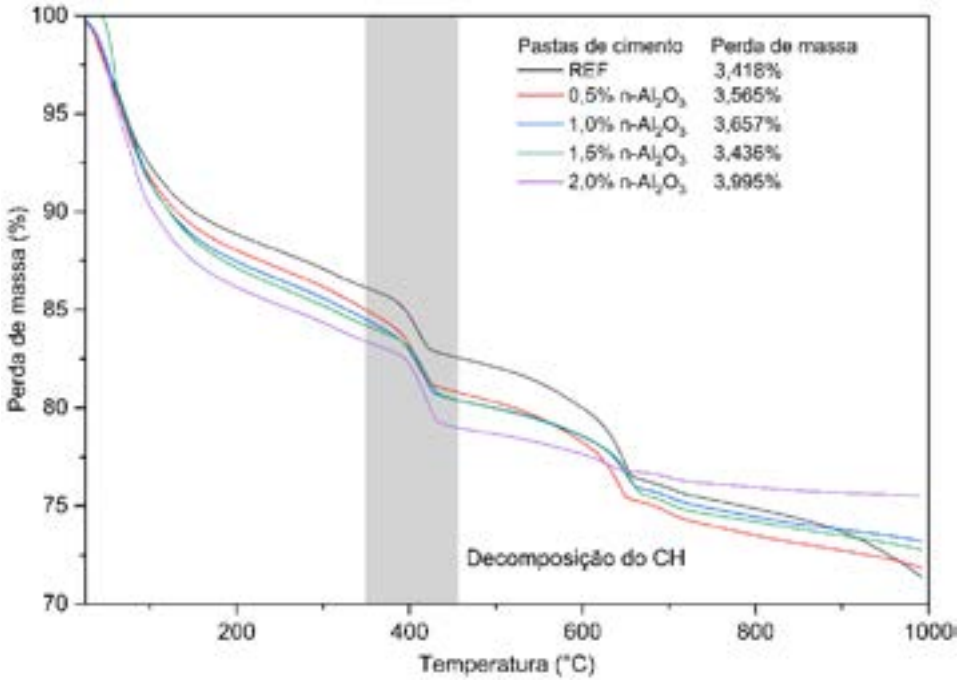


Figura 5: Termograma das pastas de cimento após 21 dias.

As pastas de cimento contendo n-Al_2O_3 apresentaram maior perda de massa relativo o CH em comparação à pasta de referência. A menor variação foi observada na pasta com 1,5% de n-Al_2O_3, resultado que pode estar relacionado ao efeito filler da nanopartícula. Esse efeito favorece a hidratação inicial ao aumentar os pontos de nucleação do C-S-H, promovendo a formação de CH e outros produtos de hidratação como C-S-H adicional. Como resultado, essa amostra apresentou o menor teor de portlandita entre todas as amostras com adição de n-Al_2O_3, conforme pode ser observado na Tabela 4. O acréscimo na quantidade de portlandita observado nas outras amostras com n-Al_2O_3 pode estar relacionado com a maior porcentagem de hidratação dessas pastas, formando maior quantidade de portlandita inicial, já que as reações pozolânicas são mais lentas.

Tabela 4: Quantidade de portlandita restante nas amostras após 21 dias.

Pastas de cimento	Perda de massa relativo ao CH (%)	Teor de portlandita (%)
REF	3,418	14,05
0,5 n-Al_2O_3	3,565	14,66
1,0 n-Al_2O_3	3,657	15,04
1,5 n-Al_2O_3	3,436	14,13
2,0 n-Al_2O_3	3,995	16,43

Na Figura 6, é possível observar os termogramas das pastas de cimento após 90 dias. Os dados de perda de massa e de teor de portlandita das pastas de cimento após 90 dias estão apresentados na Tabela 5. As pastas de cimento com n-Al_2O_3 apresentaram valores menores de perda de massa de CH em comparação com a pasta de cimento referência. Na região de decomposição do CH, a pasta de cimento referência apresentou o maior teor, enquanto as amostras com a n-Al_2O_3 apresentaram valores inferiores, sugerindo o consumo parcial desse composto nas reações pozolânicas.

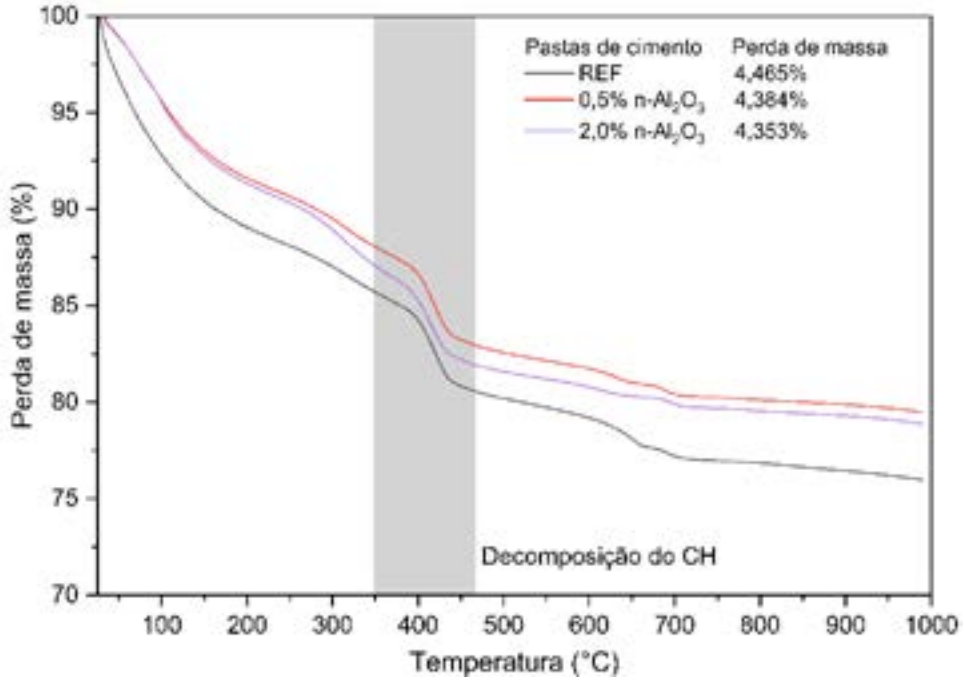


Figura 6: Termograma das pastas de cimento após 90 dias.

Tabela 5: Quantidade de portlandita restante nas amostras após 90 dias.

Pastas de cimento	Perda de massa (%)	Teor de portlandita (%)
REF	4,465	18,36
0,5 n-Al_2O_3	4,384	18,03
2,0 n-Al_2O_3	4,353	17,90

A redução na perda de massa na região de decomposição da portlandita, reforça o potencial da n-Al_2O_3 como um material pozolânico, uma vez que a atividade pozolânica promove o consumo do CH e a formação de produtos cimentícios secundários, como o C-S-H. Heikal *et al*. [35], analisaram pastas de cimento contendo n-Al_2O_3 por TGA e os resultados mostraram que a decomposição do CH apresentou valores elevados nos primeiros estágios de hidratação (1 e 28 dias). Entretanto, aos 90 dias, observaram uma redução que foi atribuída a reação pozolânica da n-Al_2O_3.

A análise de TGA demonstrou os efeitos entre a amostra referência e as pastas de cimento com adição de n-Al_2O_3. A diminuição da perda de massa nas amostras contendo a nanopartícula está associada ao consumo de CH para a formação dos produtos de hidratação.

4. CONCLUSÕES

A análise das pastas de cimento contendo n-Al_2O_3 evidenciou os efeitos positivos que a adição dessa nanopartícula fornece para a melhoria nas propriedades microestruturais e de hidratação ao longo do tempo. A redução do diâmetro de espalhamento não comprometeu o desempenho da pasta de cimento. Os resultados indicaram que a presença da n-Al_2O_3 favorece a hidratação do cimento, promovendo alterações na formação dos produtos cimentícios.

Os resultados de BET evidenciam que a adição de n-Al_2O_3 contribui para o refinamento da microestrutura das pastas de cimento, promovendo redução do volume total de poros. Esse efeito está relacionado ao preenchimento de poros pela nanopartícula e a sua reatividade pozolânica, que favorece a formação de produtos de hidratação. Dessa forma, a n-Al_2O_3 demonstra potencial para melhorar a durabilidade e o desempenho da pasta de cimento.

Os espectros de DRX das pastas de cimento mostraram os picos característicos de CH. Nas amostras contendo n-Al_2O_3, esses picos apresentam menor intensidade em comparação à amostra referência. Esses resultados sugerem que a n-Al_2O_3 influencia a cinética de hidratação, promovendo o consumo progressivo de CH e indicando a ocorrência de reação pozolânica entre a nanopartícula e o CH.

Os resultados de TGA mostram que a adição de n-Al_2O_3 contribuiu para a hidratação inicial e contribuiu para o consumo progressivo de CH. A nanopartícula contribuiu para o refinamento microestrutural e auxilia para a formação de produtos cimentícios secundários.

A adição de n-Al_2O_3 nas pastas de cimento promoveu o consumo de CH por meio da reação pozolânica, que favoreceu a formação de C-S-H, resultando em melhorias nas propriedades das pastas de cimento. Esses resultados são relevantes para aplicações em ambientes onde há alta temperatura e pressão, como no armazenamento geológico de carbono.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35-115, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647

[2] CCS BRASIL. 1º Relatório Anual de CCS no Brasil. 2023. 43p.

[3] KUTCHKO, Barbara G. et al. Degradation of well cement by CO_2 under geologic sequestration conditions. **Environmental science & technology**, v. 41, n. 13, p. 4787-4792, 2007.

[4] AGBASIMALO, Nnamdi; RADONJIC, Mileva. Experimental study of the impact of drilling fluid contamination on the integrity of cement–formation interface. **Journal of Energy Resources Technology**, v. 136, n. 4, p. 042908, 2014.

[5] LI, Ming et al. Mechanical properties and microstructure of oil well cement stone enhanced with Tetra-needle like ZnO whiskers. **Construction and Building Materials**, v. 135, p. 59-67, 2017.

[6] LIU, Kaiqiang et al. Evolution of pore structure of oil well cement slurry in suspension–solid transition stage. **Construction and Building Materials**, v. 214, p. 382-398, 2019.

[7] BRANDL, Andreas et al. Cementing solutions for corrosive well environments. **SPE Drilling & Completion**, v. 26, n. 02, p. 208-219, 2011.

[8] BARLET-GOUEDARD, Veronique et al. Well technologies for CO_2 geological storage: CO_2-resistant cement. **Oil & Gas Science and Technology-Revue de l'IFP**, v. 62, n. 3, p. 325-334, 2007.

[9] HASTENPFLUG, Daniel. Emprego de aditivos em pastas de cimento para poços de hidrocarbonetos e injeção de CO_2: influência na resistência à degradação por ataque ácido. Porto Alegre. 2012. Tese. (Doutorado em Engenharia e Tecnologia de Materiais). Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Brasil.

[10] SANTRA, Ashok; SWEATMAN, Ronald. Understanding the long-term chemical and mechanical integrity of cement in a CCS environment. **Energy Procedia**, v. 4, p. 5243-5250, 2011.

[11] LESTI, M.; TIEMEYER, C.; PLANK, J. CO_2 stability of Portland cement based well cementing systems for use on carbon capture & storage (CCS) wells. **Cement and concrete research**, v. 45, p. 45-54, 2013.

[12] BAI, Mingxing et al. Well completion and integrity evaluation for CO_2 injection wells. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 45, p. 556-564, 2015.

[13] DALLA VECCHIA, Felipe et al. Wellbore integrity in a saline aquifer: Experimental steel-cement interface degradation under supercritical CO_2 conditions representative of Brazil's Parana basin. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, v. 98, p. 103077, 2020.

[14] VIPULANANDAN, C.; MOHAMMED, A. Smart cement compressive piezoresistive, stress-strain, and strength behavior with nanosilica modification. **Journal of Testing and Evaluation**, v. 47, n. 2, p. 1479-1501, 2019.

[15] MEHAIRI, Ahmed G.; HUSEIN, Maen M. Enhancement of cement properties by means of in situ grown nanoparticles. **Construction and Building Materials**, v. 261, p. 120496, 2020.

[16] BATISTA, G. dos S. et al. Chemical resistance and mechanical properties of nanosilica addition in oil well cement. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 196, p. 107742, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107742

[17] MORAES, Martimiano K.; COSTA, Eleani M. da. Effect of adding organo-modified montmorillonite nanoclay on the performance of oil-well cement paste in CO_2-rich environments. Cement and Concrete Composites, v. 127, p. 104400, 2022. Disponível em: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946521004662

[18] SCHEMMER, Luana Bottoli et al. Testing the behavior of nanoalumina as a supplementary material to oil well cement pastes by different dispersive methods under CCS conditions. **Geoenergy Science and Engineering**, v. 224, p. 211602, 2023.

[19] BARAGWIHA, Michael Boniface et al. Influence of Various Nanomaterials on the Rheology and Hydration Kinetics of Oil Well Cement. **Materials**, v. 16, n. 19, p. 6514, 2023.

[20] DAI, Tian et al. Effects of nanoparticles on mechanical and microstructural properties of cement composite pastes at high temperature and high pressure. **Geoenergy Science and Engineering**, v. 230, p. 212262, 2023.

[21] HEIKAL, Mohamed; ISMAIL, M. N.; IBRAHIM, N. S. Physico-mechanical, microstructure characteristics and fire resistance of cement pastes containing Al_2O_3 nano-particles. **Construction and Building Materials**, v. 91, p. 232-242, 2015.

[22] SANTRA, Ashok; BOUL, Peter J.; PANG, Xueyu. Influence of nanomaterials in oilwell cement hydration and mechanical properties. In: **SPE international oilfield nanotechnology conference and exhibition**. SPE, 2012. p. SPE-156937-MS.

[23] API- **American Petroleum Institute**. Specification for Cements and Materials for Well Cementing: Specification. API SPEC 10A. Washington, 2019. 78 p.

[24] LEDESMA, Roger B. Blendas Cimentícias com Cinzas Volantes e Zeólitas para cimentação de poços de petróleo: propriedades e resistência ao ataque do CO_2 em condições de armazenamento geológico de carbono. Porto Alegre. 2023. Tese. (Doutorado em Engenharia e Tecnologia de Materiais). Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Brasil.

[25] PANG, X., Jimenez, W.C. Iverson, B.J. Hydration kinetics modeling of the effect of curing temperature and pressure on the heat evolution of oil well cement. Cement and Concrete Research, 54, 69–7, 2013.

[26] KANTRO, D.L. Influence of water-reducing admixtures on properties of cement paste – A miniature slump test. **Cement, Concrete and Aggregates**, v. 2, n. 2, p. 95-102, 1980.

[27] RAMACHANDRAN, V. S. et al. Formation and hydration of cement and cement compounds. **Handbook Therm; Anal. Constr. Mater.; William Andrew Publishing: New York, NY, USA**, 2002.

[28] BOSQUE, Isabel Fuencisla Sáez Del. **Modificaciones nanoestructurales en pastas de cemento**. 2012. Tese de Doutorado. Universidad Autónoma de Madrid.

[29] MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concrete: microstructure, properties and materials**. 3. ed. The McGraw-Hill Companies, 2006. 684p.

[30] NEVILLE, A. M. **Properties of Concrete**. Fifthed. Harlow, United Kingdom: Pearson Education Limited, 2018.

[31] NELSON, Erik B; GUILLOT, Dominique. **Well Cementing**. 2. ed. Texas: Schlumberger, 2006.

[32] ALARCON-RUIZ, Lucia et al. The use of thermal analysis in assessing the effect of temperature on a cement paste. **Cement and Concrete research**, v. 35, n. 3, p. 609-613, 2005.

[33] LU, Hu et al. Enhancing anti-carbonation properties of oil well cement slurry through nanoparticle and cellulose fiber synergy. **Construction and Building Materials**, v. 450, p. 138578, 2024.

[34] VILLAIN, Géraldine; THIERY, Mickaël; PLATRET, Gérard. Measurement methods of carbonation profiles in concrete: Thermogravimetry, chemical analysis and gammadensimetry. **Cement and concrete research**, v. 37, n. 8, p. 1182-1192, 2007.

[35] HEIKAL, Mohamed; ISMAIL, M. N.; IBRAHIM, N. S. Physico-mechanical, microstructure characteristics and fire resistance of cement pastes containing Al_2O_3 nano-particles. **Construction and Building Materials**, v. 91, p. 232-242, 2015.

44º SENAFOR

28ª Conferência Internacional de Forjamento - Brasil
14ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas / 11º Congresso do BrDDRG
14ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis
3ª Conferência Internacional de Inovação em Materiais e Manufatura
Porto Alegre, RS, dias 1, 2 e 3 de outubro de 2025
www.senafor.com

INFLUÊNCIA DA PROFUNDIDADE DE CAMADA NITRETADA NA ADESÃO DO REVESTIMENTO CrN/CrAlTiN VIA PAPVD EM AÇO FERRAMENTA AISI H13

NORA, João Vitor Piovesan Dalla [(1)]
ORTEGA, Leandro Bettoni [(2)]
CANAL, Felipe [(3)]
DIAS, Vinicius Waechter [(4)]
ROCHA, Alexandre Silva [(5)]

RESUMO

A redução de custos operacionais de matrizes empregadas em processos de conformação a quente pode ser alcançada pelo aumento de vida útil via aplicação de tratamentos superficiais dúplex (nitretação seguida de revestimento). Nessa perspectiva, este estudo investigou a influência de diferentes profundidades de nitretação a plasma seguida de revestimento via PAPVD (*Plasma Assisted Physical Vapor Deposition*) sobre as propriedades superficiais do aço ferramenta AISI H13. Amostras temperadas e revenidas, com dureza de 48 HRC, foram nitretadas a plasma em atmosfera $N_2/H_2/Ar$ (100, 50 e 80 sccm, respectivamente) a 450 ± 30 °C por dois tempos distintos (90 e 210 min) e então revestidas (CrN/CrAlTiN). Foram analisadas amostras apenas revestidas e com tratamento dúplex via microscopia óptica, ensaios de rugosidade, perfilometria a laser, microdureza superficial e adesão do revestimento segundo a norma VDI 3198. Os resultados indicaram que a nitretação promoveu um gradiente de dureza na subsuperfície, elevando a capacidade de suporte de carga do substrato e o revestimento provocou aumento de dureza e rugosidade. As amostras nitretadas com camada mais profunda obtiveram melhor adesão (HF1) e menos falhas. Conclui-se que o tratamento dúplex melhorou significativamente a capacidade de suporte de carga e a adesão do revestimento, sendo a melhor condição a combinação entre a nitretação de maior profundidade e revestimento.

Palavras-chave — AISI H13, Nitretação a plasma, PVD, Dúplex, Adesão.

Influence of Nitrided Layer Depth on the Adhesion of CrN/CrAlTiN Coating via PAPVD on AISI H13 Tool Steel

ABSTRACT

The reduction of operational costs for dies used in hot forming processes can be achieved by extending their service life through the application of duplex surface treatments (nitriding followed by coating). From this perspective, this study investigated the influence of different plasma nitriding depths followed by coating via PAPVD (Plasma Assisted Physical Vapor Deposition) on the surface properties of AISI H13 tool steel. Quenched and tempered samples, with a hardness of 48 HRC, were plasma nitrided in a N_2/H_2/Ar atmosphere (100, 50, and 80 sccm, respectively) at 450 ± 30 °C for two distinct times (90 and 210 min) and then coated (CrN/CrAlTiN). Coated-only samples and duplex-treated samples were analyzed using optical microscopy, roughness tests, laser profilometry, surface microhardness, and coating adhesion tests according to the VDI 3198 standard. The results indicated that nitriding promoted a subsurface hardness gradient, increasing the load-bearing capacity of the substrate, and the coating caused an increase in hardness and roughness. Samples nitrided with a deeper layer obtained better adhesion (HF1) and fewer failures. It is concluded that the duplex treatment significantly improved the load-bearing capacity and coating adhesion, with the best condition being the combination of the deepest nitriding and the coating.

Key words — AISI H13, Plasma nitriding, PVD, Duplex, Adhesion.

1. INTRODUÇÃO

O presente estudo está vinculado ao Projeto Mover: Projeto e Fabricação de Matrizes de Forjamento Integrados à Engenharia de Superfícies, Linha IV - Ferramentarias Brasileiras Mais Competitivas. O projeto se baseia na divergência entre resultados da literatura sobre a potencial melhoria de desempenho gerado pela combinação de tratamentos superficiais a matrizes de forjamento e a não correspondência total dessas melhorias em âmbito industrial, constatado com algumas das empresas parceiras. Desta forma, este estudo buscou investigar a combinação de tratamentos superficiais de nitretação a plasma e PVD (*Physical Vapor Deposition* - Deposição Física de Vapor) e o efeito sinérgico deles em aço ferramenta AISI H13 temperado e revenido. Durante o uso de ferramentas aplicadas em forjamento, grande parte da sua vida útil é reduzida devido a fatores como projeto não otimizado, material inadequado, fraturas por fadiga e, principalmente, desgaste abrasivo e deformação plástica [1]. Dessa forma, uma vez que o desgaste abrasivo ocorre na superfície de contato entre ferramenta e forjado, as propriedades da superfície e subsuperfície são de extrema importância para a melhor projeto e maior vida útil da mesma. A combinação de tratamentos superficiais como a nitretação a plasma e revestimento via PVD, também conhecido como dúplex, é amplamente aplicada no trabalho a quente uma vez que pode gerar aumento da vida útil de matrizes empregadas na conformação de metais [2]. O principal objetivo da nitretação aplicada anteriormente ao revestimento é o aumento da dureza superficial na interface revestimento e substrato, minimizando a queda de dureza do material base em altas temperaturas [3]. O uso de nitretação a plasma seguida de

revestimento PVD promove melhoria da vida útil pelo aumento de resistência à corrosão, ao desgaste e capacidade de suporte de carga em relação a substratos de aço sem nitretação [4].

Assim, este estudo explorou a utilização de tratamentos dúplex no aço ferramenta AISI H13 temperado e revenido (48 HRC), nas condições de apenas revestido (48-PVD) e com tratamento dúplex via PAPVD para duas profundidades de camada nitretada (48-N1PVD e 48-N2PVD). Os principais objetivo do estudo foram: a caracterização da superfície e subsuperfície, avaliação qualitativa da adesão e suporte de carga via ensaios de rugosidade, microscopia óptica e eletrônica de varredura, microdureza superficial e ensaios de adesão (VDI 3198).

2. METODOLOGIA

Neste trabalho foi utilizado o aço ferramenta para trabalho a quente AISI H13, temperado e revenido com dureza média de 48 HRC (durômetro PRECISION modelo MRS). As amostras utilizadas possuem dimensões de Ø 25 x 5 mm de altura, sendo lixadas e polidas até atingirem acabamento espelhado antes da aplicação dos tratamentos a plasma e/ou revestimento. O resultado da composição química analisada via espectrometria de emissão óptica é apresentada na Tabela 1.

TABELA 1. Composição química do aço AISI H13 utilizado no estudo (% em massa).

Elemento (% em massa)	**C**	**Si**	**Mn**	**Cr**	**Mo**	**V**	**Fe**
AISI H13	0,40	0,84	0,32	5,2	1,25	0,84	Balanço

Inicialmente as amostras temperadas e revenidas foram limpas utilizando agentes químicos desengraxantes e antioxidantes antes da nitretação ou revestimento (amostras apenas revestidas). No tratamento de nitretação a plasma a temperatura utilizada foi de 450 ± 30 °C, atmosfera contendo 100 sccm de N2, 80 sccm de Ar e 50 sccm de H2 e tempo de tratamento de 90 min e 210 minutos (48-N2PVD). Após nitretação as amostras foram polidas e em seguida revestidas com filme de CrN/CrAlTiN via arco catódico com temperatura de processo de 450 ± 30 °C. Antes do revestimento em si, foi realizada uma etapa de bombardeamento iônico com H_2 e Ar, uma etapa de limpeza e ativação da superfície que também promove o aquecimento das amostras. A deposição do revestimento teve duração de 190 minutos para obtenção de uma espessura de camada de aproximadamente 4 µm. Os tratamentos dúplex com camada nitretada menos profunda e mais profunda foram denominados 48-N1PVD e 48-N2PVD, respectivamente. Ambos os tratamentos superficiais (nitretação e revestimento) foram realizados pela empresa Oerlikon Balzers.

2.1 Topografia

Ensaios de rugosidade e de perfilometria óptica 3D foram utilizados para investigação topográfica. Para aferição da rugosidade, 5 medições foram executadas utilizando rugosímetro Mitutoyo SJ-210 para cada uma das condições analisadas, com velocidade da haste de 0,25 mm/s, *cut-off* de 0,8 mm e comprimento de medição de 4 mm seguindo a norma ISO 4287-1997, registrando valores de R_a e R_z. A análise via perfilometria óptica foi realizada utilizando equipamento Bruker (GTK M, CONTOURGTK) e média de três medições.

2.2 Morfologia

As amostras foram cortadas utilizando máquina de corte de precisão TechCut 4TM, embutidas em baquelite, lixadas (100 - 1200 *mesh*) e polidas utilizando pasta de diamante de 3 µm para análise da morfologia da seção transversal. Para revelar a microestrutura elas foram atacadas utilizado reagente Nital (2%) durante 5 segundos e a observação e captura de imagens foi realizada em microscópio óptico OLYMPUS GX-51 com auxílio do *software* AnalySIS. Foi utilizado o *software* ImageJ® para medição da espessura do revestimento através da análise de 3 imagens com aumento de 1000 vezes foram realizando-se 12 medições verticais para cada imagem, descartando o maior e menor valor.

2.3 Microdureza Superficial Vickers

Nos ensaios de microdureza superficial foram utilizadas cargas de 1, 0,5, 0,3, 0,2, 0,1 e 0,05 kgf, com tempo de 10 segundos (microdurômetro Digimess, modelo 400.301) e repetição de 5 medições para cada carga e condição de tratamento, localizadas no meio raio das amostras. O ensaio e cálculo da profundidade de indentação seguiram as recomendações da norma ASTM E92 [5].

2.4 Adesão

O ensaio é executado como uma medição de dureza Rockwell C (carga de 150 kgf e indentador de diamante cônico) e, dependendo da distribuição das trincas superficiais e presença ou não de delaminação ao longo da indentação, a adesão do revestimento pode ser avaliada utilizando padrões da norma VDI 3198. Os índices HF indicam a quantidade de micro trincas e delaminação formada ao redor da indentação, sendo considerada uma adesão aceitável de HF1 - HF4 e HF5 - HF6 não aceitável [6].

3. RESULTADOS

3.1 Análise topográfica

A rugosidade média (R_a) (Figura 1 A) apresentou tendência de aumento com a aplicação do revestimento em substratos nitretados, sendo maior para a nitretação de maior profundidade.

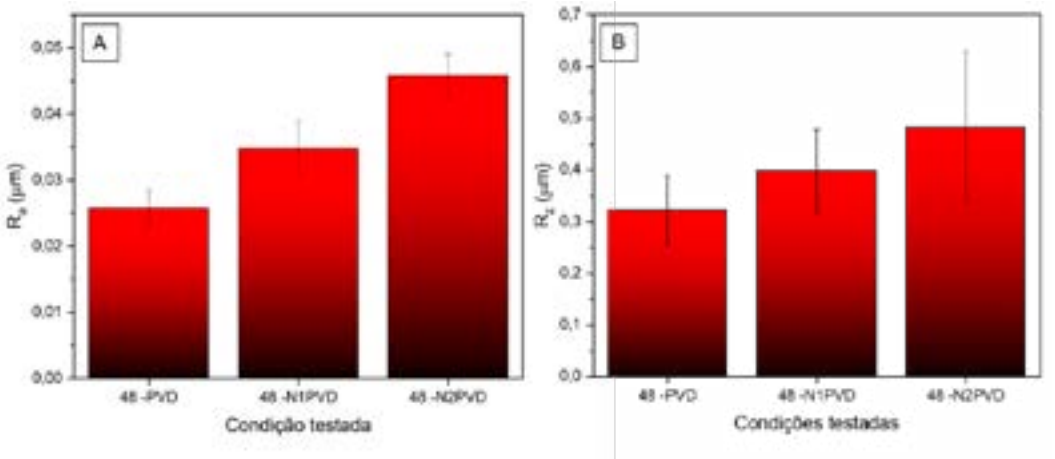
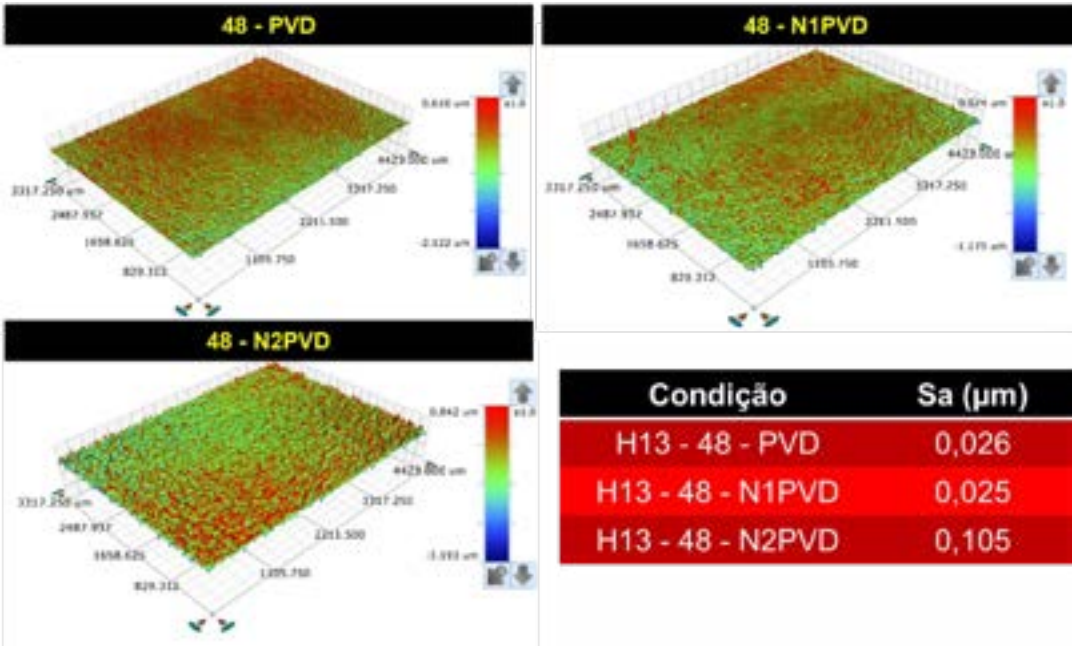


Figura 1: Rugosidade para os parâmetros R_a (A) e R_z (B) para as diferentes condições de tratamentos superficiais analisadas.

O revestimento tende a replicar a superfície base e, no caso de 48-N2PVD, a formação de nitretos na superfície pode gerar maior rugosidade final após revestimento. Uma hipótese para explicar este resultado é a diferença na taxa de remoção durante bombardeamento iônico (*ion etching*, na primeira etapa do revestimento) entre a matriz martensítica, carbonetos [7] e, neste caso de nitretos, causando a diferença de topografia e na rugosidade. Em média, R_z apresentou um comportamento parecido ao R_a, porém dentro do desvio-padrão para todos os casos.



Condição	Sa (µm)
H13 - 48 - PVD	0,026
H13 - 48 - N1PVD	0,025
H13 - 48 - N2PVD	0,105

Figura 2: Perfilometria 3D das condições de tratamentos superficiais analisadas e tabela contendo os valores de rugosidade média em área (S_a) encontrados.

Na Figura 2 são apresentadas as topografias das amostras nas condições de apenas revestidas e com tratamento dúplex. As asperezas oriundas do revestimento estão realçadas em vermelho pela escala do *software* utilizado. Um comportamento semelhante foi encontrado nos ensaios de rugosidade (Figura 1) e de perfilometria para S_a (rugosidade média em área – Figura 2), porém com maiores valores para a condição 48-N2PVD (0,105 µm).

3.2 Análise morfológica

A microestrutura da seção transversal das amostras foi compilada na Figura 4. Em todos os casos a espessura média do filme foi de 4 µm, sem grandes variações, demonstrando a efetividade do método utilizado.

Na Figura 3 A é possível observar o revestimento (região clara) seguida do substrato formado, majoritariamente, por martensita revenida. A zona de difusão nas amostras com tratamento dúplex é visualizada pela região mais escura após ataque com reagente Nital (2%), sendo menos visível para a condição 48 - N1PVD (Figura 3 B) e mais destacada no substrato com maior tempo de nitretação 48 - N2PVD (Figura 3 C). Na camada nitretada mais profunda nitretos em contornos de grão foram identificados e destacados em verde (Figura 3 C).

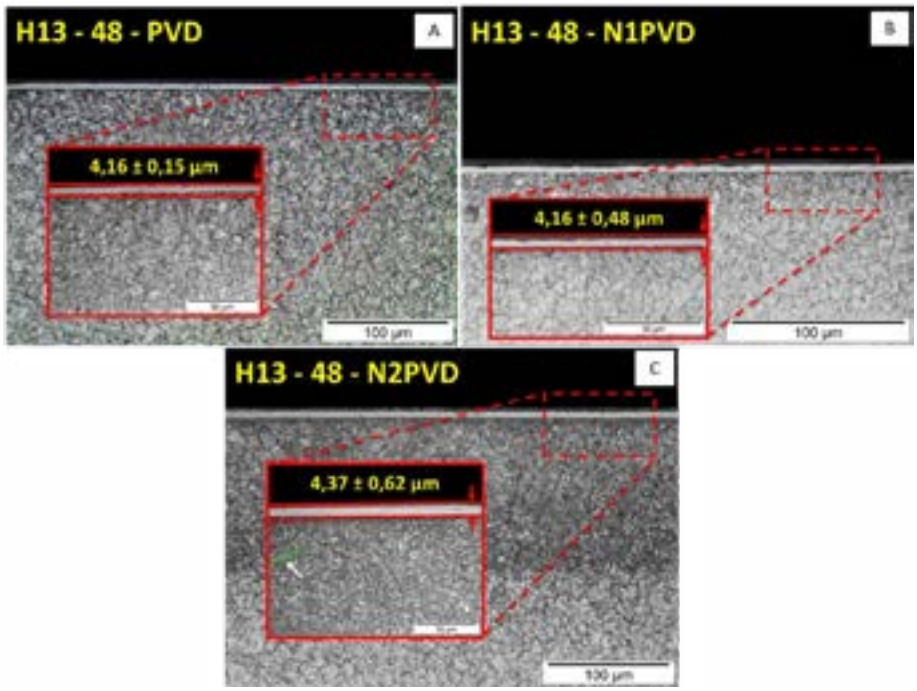


Figura 3: Revestimento (região clara) e microestrutura composta por martensita revenida (A), revestimento e zona de difusão com menor (B) e maior (C) profundidade. A região destacada em verde com seta branca indica a presença nitretos em contorno de grão e em amarelo a espessura média do revestimento.

3.3 Microdureza superficial Vickers

Em materiais com tratamentos superficiais, a carga aplicada no ensaio de dureza influencia diretamente no resultado. Cargas reduzidas são empregadas para medir camadas mais superficiais, pois sua menor penetração faz com que a medição represente melhor a área de interesse. Contudo, a heterogeneidade inerente a essas superfícies - como alta rugosidade - pode aumentar a dispersão dos dados sob cargas menores. Os resultados de microdureza superficial (Figura 4 A) deixam claro a maior capacidade de suporte de carga para o tratamento dúplex com camada nitretada mais profunda (48 - N2PVD), haja visto os maiores valores de microdureza em comparação com as demais condições testadas em todas as cargas avaliadas.

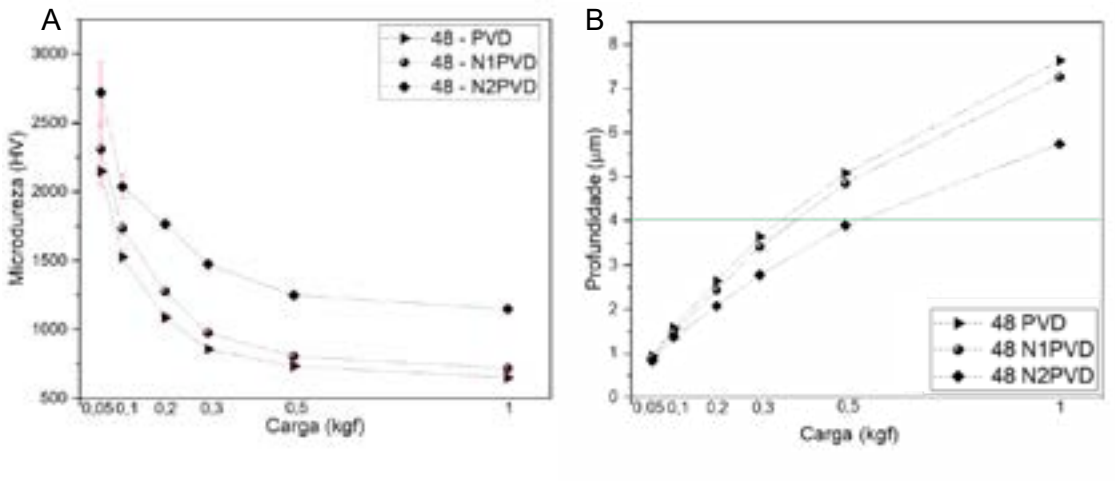


Figura 4: Microdureza superficial Vickers (A) e profundidade (B) para diferentes cargas nos diferentes tratamentos superficiais aplicados. A linha verde indica a espessura média do revestimento.

A influência do substrato nitretado foi particularmente evidente em cargas baixas (0,05 kgf), onde a microdureza da condição 48 - N2PVD ultrapassou 2700 $HV_{0,05}$, superando significativamente 48 - N1PVD (~2300 $HV_{0,05}$) e 48-PVD (~2150 $HV_{0,05}$). Essa tendência se manteve sob 1 kgf, com o 48 - N2PVD atingindo aproximadamente 1150 HV_1 contra cerca de aproximadamente 700 HV_1 das demais condições. Por consequência, a profundidade atingida pelas indentações também foi menor para 48 – N2PVD (Figura 4 B), sendo menor do que 4 µm (espessura do revestimento) até a carga de 0,5 kgf.

3.4 Adesão

Os resultados de adesão para as três condições testadas foram compilados na Figura 5. A condição 48-PVD apresentou falhas aceitáveis de acordo com o método, sendo classificada como HF3, entretanto foram identificadas microtrincas e delaminações/desprendimento do revestimento.

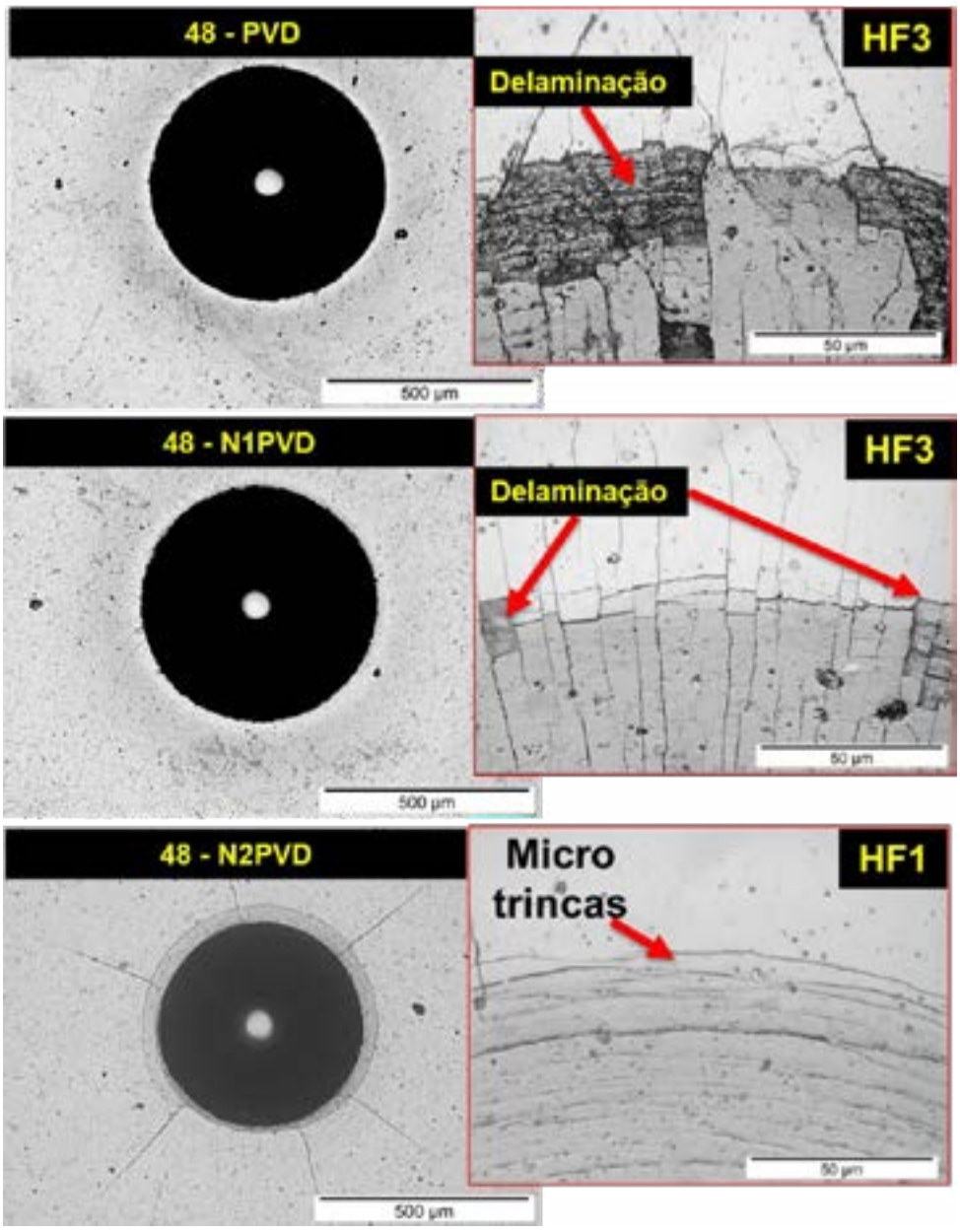


Figura 5: Microscopias ópticas dos ensaios de adesão seguindo a norma VDI 3198 amostras apenas revestidas (48 - PVD) e com tratamento dúplex (48 - N1PVD e 48 - N2PVD).

A condição com tratamento dúplex com menor camada nitretada (48 - N1PVD) obteve um comportamento semelhante a não nitretada, apesar de apresentar regiões menores delaminadas, indicando que o tratamento de nitretação de menor tempo não foi suficientemente efetivo para o aço nesta condição de dureza. Para 48 - N2PVD a adesão do revestimento atingiu a melhor condição (HF1), sem presença de delaminação, apenas microtrincas.

4. CONCLUSÕES

• Em substratos nitretados ou não, houve aumento da rugosidade (R_a e R_z) após aplicação do revestimento;
• O tratamento dúplex (nitretação seguida de revestimento) propiciou uma melhor capacidade de sustentação de carga;
• A adesão do revestimento também foi melhorada pela utilização do tratamento dúplex, sendo encontrado índice HF3 para as amostras apenas revestidas e HF1 no tratamento dúplex com maior profundidade de camada nitretada;
• A melhor condição testada em relação à adesão de filme ao substrato e capacidade de suporte de carga foi o tratamento dúplex, combinando a nitretação com maior profundidade e revestimento.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido com apoio da FUNDEP e está inserido Projeto Mover: Projeto e Fabricação de Matrizes de Forjamento Integrados à Engenharia de Superfícies. João Vitor Piovesan Dalla Nora agradece ao CNPq (Processo n° 140743/2024-3), Alexandre da Silva Rocha agradece ao CNPq/MCTI 10/2023 (Processo n° 308773/2018-7) e Auxílio à Pesquisa (APQ) processo n° 407742/2023-9 Felipe Canal agradece à CAPES (Processo n° 88887.988547/2024-00).

REFERENCES

[1] Z. Gronostajski, M. Kaszuba, M. Hawryluk, M. Zwierzchowski, *A review of the degradation mechanisms of the hot forging tools*, Archives of Civil and Mechanical Engineering 14 (2014) 528–539. https://doi.org/10.1016/j.acme.2014.07.002.
[2] A.A. Emamverdian, Y. Sun, C. Cao, C. Pruncu, Y. Wang, *Current failure mechanisms and treatment methods of hot forging tools (dies) - a review*, Eng Fail Anal 129 (2021) 105678. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105678.
[3] D. Özkan, M.A. Yilmaz, D. Karakurt, M. Szala, M. Walczak, S.A. Bakdemir, C. Türküz, E. Sulukan, *Effect of AISI H13 Steel Substrate Nitriding on AlCrN, ZrN, TiSiN, and TiCrN Multilayer PVD Coatings Wear and Friction Behaviors at a Different Temperature Level*, Materials 16 (2023). https://doi.org/10.3390/ma16041594.
[4] K. Das, J. Alphonsa, M. Ghosh, J. Ghanshyam, R. Rane, S. Mukherjee, *Influence of pretreatment on surface behavior of duplex plasma treated AISI H13 tool steel*, Surfaces and Interfaces 8 (2017) 206–213. https://doi.org/10.1016/j.surfin.2017.06.009.
[5] ASTM, Vickers Hardness of Matallic Materials, ASTM E92-04, American Society for Testing and Materials (1997) 10.
[6] A.P. Krelling, C.E. da Costa, J.C.G. Milan, E.A.S. Almeida, *Micro-abrasive wear mechanisms of borided AISI 1020 steel*, Tribol Int 111 (2017) 234–242. https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.03.017.
[7] P. Panjan, A. Drnovšek, P. Gselman, M. Čekada, M. Panjan, *Review of growth defects in thin films prepared by PVD techniques*, 2020. https://doi.org/10.3390/COATINGS10050447.

44th SENAFOR
28th International Forging Conference
14th International Sheet Metal Forming Conference / 11th BrDDRG Congress
3rd International Conference on Innovation in Materials and Manufacturing

Plaza São Rafael Hotel, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brazil
October 1, 2 and 3, 2025

Influência do álcool polivinílico (PVA) como agente formador de poros em eletrodos sinterizados obtidos por metalurgia do pó (MP)

Influence of polyvinyl alcohol (PVA)as a space holder on the porosity of sintered electrodes obtained by powder metallurgy (PM)

Willian Delfim da Silva[1]
Clayton André Oliveira da Motta[2]
Lirio Schaeffer[3]

RESUMO

Eletrodos metálicos porosos têm despertado grande interesse em tecnologias de armazenamento e conversão de energia devido à sua elevada área superficial, transporte iônico facilitado e aumento do número de sítios eletroativos. Neste estudo, eletrodos de ferro porosos foram fabricados por meio da rota de metalurgia do pó utilizando álcool polivinílico como agente formador de poros. As misturas de pó foram compactadas uniaxialmente sob pressões de 60, 80, 100 e 120 MPa, seguidas de sinterização em duas etapas, sendo um patamar intermediário a 300 °C para promover a remoção controlada do álcool polivinílico e a 1.050 °C por 30 min sob atmosfera de argônio, com pré-vácuo. A influência do conteúdo de álcool polivinílico na porosidade, morfologia dos poros e conectividade microestrutural foi sistematicamente investigada. As análises morfológicas indicaram que o álcool polivinílico promoveu de forma eficaz a formação de poros abertos e interconectados, com valores de porosidade variando de níveis moderados a elevados, adequados para aplicações eletroquímicas. A variação da pressão de compactação permitiu ajustar a distribuição e o tamanho dos poros, evidenciando o equilíbrio entre a estabilidade mecânica e a porosidade elevada. Análises estruturais confirmaram a estabilidade da fase metálica e a ausência de oxidação significativa. Os resultados demonstram que a técnica de *space holder* utilizando álcool polivinílico é uma abordagem eficiente e reprodutível para controlar a microestrutura e as propriedades funcionais de eletrodos porosos, oferecendo diretrizes importantes para aplicações em baterias, células a combustível e outros dispositivos eletroquímicos.

Palavras-chave: eletrodos porosos; eletrodos sinterizados; técnica de space holder; metalurgia do pó.

[1]Mestrando em Processos de Fabricação no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av. Bento Gonçalves, 9500, CEP: 91501-970, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil. E-mail: *willian.delfim@ufrgs.br*

[2]Doutorando em Processos de Fabricação no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av. Bento Gonçalves, 9500, CEP: 91501-970, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil. E-mail: *clayton.motta@ufrgs.br*

[3]Doutor em Engenharia, coordenador do Centro Brasileiro de Inovação em Conformação Mecânica, professor colaborador na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av. Bento Gonçalves, 9500, CEP: 91501-970, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil. E-mail: *schaefer@ufrgs.br*

ABSTRACT

Porous metallic electrodes have attracted considerable attention in energy storage and conversion technologies due to their high surface area, enhanced ionic transport, and increased number of electroactive sites. In this study, porous iron electrodes were fabricated using the powder metallurgy route with polyvinyl alcohol as a space holder. Powder mixtures were uniaxially compacted at pressures of 60, 80, 100, and 120 MPa, followed by a two-stage sintering process, being a intermediate dwell at 300 °C to ensure controlled removal of polyvinyl alcohol and at 1,050 °C for 30 min under argon atmosphere, with a preliminary vacuum. The influence of polyvinyl alcohol content on porosity, pore morphology, and microstructural connectivity was systematically investigated. Morphological analyses revealed that polyvinyl alcohol effectively promoted the formation of open and interconnected pores, with porosity values ranging from moderate to high levels suitable for electrochemical applications. The variation of compaction pressure allowed tuning of pore size distribution and densification, highlighting the trade-off between mechanical stability and high porosity. Structural analyses confirmed the stability of the metallic phase and the absence of significant oxide formation. The results demonstrate that the space holder technique using polyvinyl alcohol is an efficient and reproducible approach to tailor the microstructure and functional properties of porous electrodes, providing valuable guidelines for their application in batteries, fuel cells, and other electrochemical devices.

Keywords: porous electrodes; sintered electrodes; space holder technique; powder metallurgy.

1 INTRODUÇÃO

O cenário energético global tem passado por transformações significativas, impulsionadas pela crescente demanda por fontes limpas e pela necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa. A expansão de energias renováveis intermitentes, como solar e eólica, torna imprescindível o desenvolvimento de sistemas de armazenamento de energia eficientes, confiáveis e economicamente viáveis. Nesse contexto, as baterias despontam como dispositivos capazes de, com alta densidade energética, durabilidade e segurança operacional, assumirem um papel central, permitindo não apenas o armazenamento de energia elétrica, mas também o gerenciamento inteligente da oferta e da demanda em redes elétricas modernas e veículos elétricos, promovendo maior estabilidade, confiabilidade e sustentabilidade no fornecimento energético (Yang *et al.*, 2022; Zhou *et al.*, 2016).

Dentre as tecnologias de armazenamento, algumas baterias baseadas em eletrodos metálicos têm se destacado devido à elevada densidade energética e ao potencial para longa vida útil. O desempenho desses sistemas depende não apenas da composição química dos eletrodos, mas também de suas propriedades microestruturais, como porosidade, interconectividade dos poros e distribuição de partículas. A engenharia da microestrutura dos eletrodos é fundamental para ampliar a área eletroativa disponível, facilitar a difusão de íons e otimizar a condução elétrica, promovendo reações eletroquímicas mais rápidas e eficientes. Nesse contexto, eletrodos porosos tornam-se especialmente atrativos para aplicações em sistemas de armazenamento de alta densidade de energia e em dispositivos portáteis, nos quais o equilíbrio entre potência, durabilidade e segurança é essencial (Qu, 2014; Wang *et al.*, 2021).

Materiais metálicos porosos têm ganhado atenção significativa devido às suas excelentes propriedades funcionais, como alta condutividade elétrica e térmica, elevada relação entre resistência e peso, grande área superficial específica e permeabilidade ajustável (Dukhan *et al.*, 2020; Cui *et al.*, 2016). Esses materiais são empregados em diversas aplicações, incluindo filtros, catalisadores, componentes estruturais leves, implantes biomédicos e sistemas de armazenamento de energia (Bętkowska *et al.*, 2025; Zhao *et al.*, 2018). A capacidade de controlar a porosidade e a morfologia dos poros é determinante para otimizar o desempenho em cada aplicação.

A metalurgia do pó (MP) surge como uma rota promissora para a fabricação de materiais metálicos porosos, permitindo flexibilidade na composição de ligas, controle da densidade e ajuste da porosidade (Arifvianto; Zhou, 2014; Jha *et al.*, 2013). Técnicas como prensagem e sinterização possibilitam a obtenção de poros interconectados ou fechados, conforme a necessidade funcional, e podem ser combinadas com métodos complementares, como o uso de agentes formadores de poros, também chamados de *space holders* (SH), para alcançar estruturas mais uniformes e controladas (Yanping *et al.*, 2025; Sathaiah *et al.*, 2021). Esses métodos apresentam baixo custo, simplicidade operacional e viabilidade industrial, constituindo uma alternativa eficaz frente a processos mais complexos de fundição ou manufatura aditiva (MA).

A configuração adequada da microestrutura porosa é especialmente relevante em eletrodos para sistemas eletroquímicos, onde poros bem distribuídos favorecem a penetração do eletrólito, aumentam a área de reação e reduzem perdas de transporte (Zhou *et al.*, 2016). A escolha dos métodos de fabricação e das condições de processamento influencia diretamente a distribuição, forma e tamanho dos poros, o que, por sua vez, impacta a performance eletroquímica e mecânica do material (Ayub *et al.*, 2022). Consequentemente, o desenvolvimento de estratégias de engenharia microestrutural tem se mostrado essencial para otimizar eletrodos destinados a aplicações de alta potência e longo ciclo de vida.

Diante desse cenário, a presente pesquisa se insere na investigação de materiais metálicos porosos produzidos por MP, buscando compreender como diferentes abordagens de fabricação podem influenciar a estrutura e as propriedades finais dos eletrodos. Ao explorar técnicas de manipulação da porosidade e das características microestruturais, este trabalho contribui para a ampliação do conhecimento sobre o desenvolvimento de materiais funcionais de alto desempenho, com potencial aplicação em sistemas de armazenamento de energia e tecnologias associadas a energias renováveis.

2 MATERIAIS POROSOS METÁLICOS

Materiais porosos sólidos são constituídos por uma fase contínua que garante a sustentação estrutural, e por uma fase fluida, que preenche os vazios interconectados e estabelece interação com o meio externo. Para serem classificados como porosos, devem atender a dois critérios fundamentais, sendo o primeiro a presença de um volume expressivo de poros e o segundo a existência de uma rede porosa projetada para conferir propriedades específicas de desempenho. Dessa forma, a porosidade deve ser compreendida não apenas como um atributo estrutural, mas como uma fase funcional incorporada de maneira deliberada durante o processo de concepção e engenharia do material (Liu; Chen, 2014).

Os metais porosos representam uma classe relativamente recente de materiais de engenharia, desenvolvidos com o objetivo de atender simultaneamente a requisitos estruturais e funcionais. Essa categoria de materiais apresenta um conjunto de propriedades vantajosas entre as quais se destacam a baixa densidade aparente, a elevada área superficial

específica, a baixa condutividade térmica, a elevada permeabilidade, a capacidade de dissipação e gerenciamento de energia, o amortecimento mecânico, a supressão de vibrações, a absorção sonora e a blindagem eletromagnética (Liu; Chen, 2014; Dukhan *et al.*, 2020). A multifuncionalidade, característica principal desses materiais, justifica sua ampla gama de aplicações que abrange filtros, separadores de fluidos, trocadores de calor, dissipadores de chama, silenciadores, amortecedores, eletrodos porosos, suportes catalíticos, implantes biomédicos, blindagens eletromagnéticas e componentes estruturais leves (Liu; Chen, 2014; Zhao *et al.*, 2018).

A microestrutura desses materiais é fortemente influenciada pelos métodos de processamento adotados e pela natureza das matérias-primas utilizadas. A porosidade total, o tamanho médio dos poros e a respectiva distribuição configuram parâmetros estruturais determinantes para o desempenho. Entre as características mais relevantes encontram-se o controle do tamanho dos poros, a possibilidade de ajuste nos níveis de porosidade, a elevada área superficial específica e a estabilidade estrutural sob altas temperaturas ou em condições de ciclos térmicos repetidos (Liu; Chen, 2014; Francis, 2016). Avanços recentes têm explorado abordagens baseadas em processos como a MP, a síntese de espumas metálicas e métodos de MA, o que possibilita a concepção de geometrias hierárquicas e amplia o potencial de aplicação em áreas que incluem armazenamento e conversão de energia, sensores e catálise (Dukhan *et al.*, 2020).

2.1 CLASSIFICAÇÃO E PARÂMETROS CARACTERIZADORES

Os materiais porosos podem ser classificados de acordo com a morfologia de seus poros em duas categorias principais, entre poros fechados que não estabelecem conexão com o ambiente externo, e poros abertos que mantêm comunicação direta com o meio, sendo estes subdivididos em poros cegos, caracterizados pela presença de apenas uma extremidade aberta, e poros passantes, que apresentam ambas as extremidades abertas (Jang; Kang, 2022). A Figura 1 apresenta essas diferentes morfologias de poros segundo a classificação proposta pela União Internacional de Química Pura e Aplicada (IUPAC, do inglês *International Union of Pure and Applied Chemistry*).

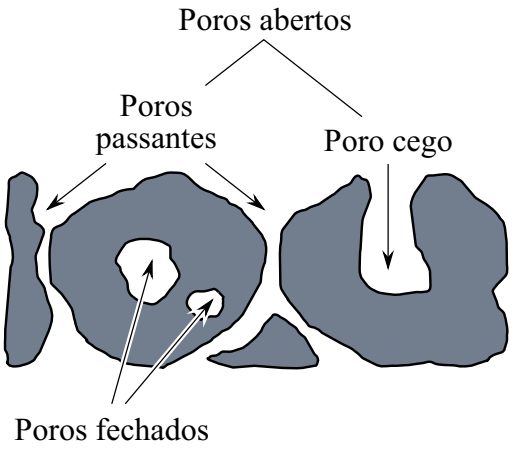


Figura 1 — Morfologias de poros em materiais porosos.
Fonte: Jang e Kang (2022).

Os principais parâmetros arquitetônicos que influenciam as propriedades dos metais porosos são a fração volumétrica de poros, também denominada de porosidade, e o

tamanho dos poros. Outras características relevantes incluem a forma, a tortuosidade, a conectividade, a orientação e a distribuição desses elementos (Dukhan *et al.*, 2020).

A densidade real corresponde à densidade intrínseca do material, obtida pela exclusão de poros e vazios interparticulares, sendo equivalente à densidade teórica do sólido na ausência de porosidade. A densidade aparente considera o volume total do material, incluindo poros fechados e poros inacessíveis a fluidos de referência. Por sua vez, a densidade global, também denominada densidade *bulk*, abrange todos os poros e os vazios interparticulares presentes entre as partículas soltas (Rouquérol *et al.*, 1994).

A análise da distribuição dos poros em materiais porosos é fundamental para a compreensão de seu comportamento estrutural e funcional, uma vez que a morfologia e a conectividade dos poros exercem influência direta sobre propriedades como permeabilidade, difusão e área superficial específica. A Figura 2 ilustra a distribuição de poros em um eletrodo poroso, evidenciando a heterogeneidade característica dessas estruturas.

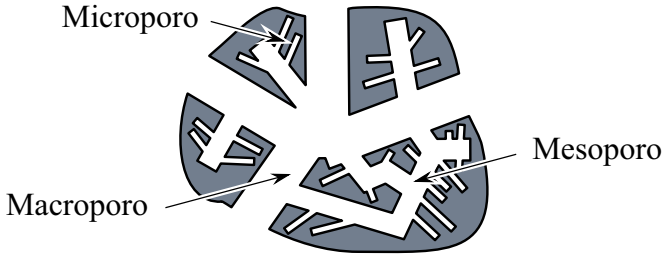


Figura 2 — Distribuição de poros em um eletrodo poroso.
Fonte: Qu (2014).

De acordo com a classificação estabelecida pela IUPAC, os poros são categorizados em três faixas de tamanho distintas. Os microporos apresentam largura inferior a 2 nm, os mesoporos possuem largura entre 2 e 50 nm e os macroporos apresentam largura superior a 50 nm (Rouquérol *et al.*, 1994; Qu, 2014). A área superficial de um material poroso corresponde à soma das contribuições de todos os poros presentes na estrutura. Em termos gerais, a porosidade de uma massa de material sólido está intrinsecamente relacionada ao tamanho das partículas que a constituem (Qu, 2014).

2.2 ELETRODOS POROSOS

Metais porosos caracterizam-se por elevada condutividade elétrica e notável capacidade de autossustentação, associados a uma rede de numerosos poros internos e a uma extensa área superficial efetiva. Propriedades essas que conferem-lhes grande potencial para aplicações em sistemas de armazenamento eletroquímico, células a combustível, baterias de ar e células fotovoltaicas (Liu; Chen, 2014).

Eletrodos porosos são capazes de compensar a taxa intrínseca lenta de reações eletroquímicas heterogêneas ao fornecer uma grande área interfacial por unidade de volume. A compactação desses eletrodos pode reduzir a queda de potencial ôhmico, diminuindo a distância que a corrente elétrica deve percorrer e, consequentemente, fornecendo vantagens claras na redução de perdas em bateria (Newman; Tiedemann, 1974). Nesses dispositivos, a reação ocorre em toda a espessura do eletrodo, com o plano de reação distribuído, que reduz consideravelmente as limitações de difusão e a queda ôhmica (Santhanagopalan; White, 2009).

Um eletrodo poroso pode ser definido como um sólido compósito contendo espaços vazios interconectados que constituem uma porção significativa do volume, de modo a modificar o seu comportamento eletroquímico. Trata-se de uma matriz sólida contendo uma quantidade suficiente de vazios cujas dimensões geométricas são pequenas em comparação com as dimensões totais do eletrodo (Santhanagopalan; White, 2009).

As propriedades físicas fundamentais que caracterizam um eletrodo poroso são a porosidade da matriz e a distribuição do tamanho dos poros. A porosidade representa a fração de vazios em relação ao volume total do eletrodo, e fornece uma medida da quantidade de eletrólito disponível para as reações eletroquímicas. A distribuição do tamanho dos poros pode ser utilizada como parâmetro de projeto para controlar ou regular a taxa das reações internas (Santhanagopalan; White, 2009). A tortuosidade dos poros é outro parâmetro crítico, que caracteriza a resistência oferecida pela fase eletrolítica ao transporte iônico e definida como a razão entre a distância efetiva percorrida pelos íons e a espessura geométrica do eletrodo poroso (Santhanagopalan; White, 2009).

Entre as linhas de pesquisa mais relevantes está a descoberta de novos materiais para eletrodos. Outra estratégia para melhorar a densidade de energia e potência consiste na engenharia do eletrodo, que envolve modificações no projeto e na estrutura para aumentar a fração de material ativo e otimizar propriedades de transporte (Nie *et al.*, 2021). Eletrodos sinterizados espessos podem oferecer densidade de energia e capacidade por área superiores em nível de célula, embora apresentem menor utilização da capacidade baseada em massa em taxas de carga e descarga elevadas, devido a limitações de transporte iônico e eletrônico (Nie *et al.*, 2021). Assim, a área superficial eletroquimicamente acessível torna-se mais relevante para a engenharia de eletrodos do que a área superficial física total

Entre as linhas de pesquisa mais relevantes destaca-se a descoberta de novos materiais para eletrodos. Outra estratégia para aumentar a densidade de energia e de potência consiste na engenharia do eletrodo, que envolve modificações no projeto e na estrutura, visando incrementar a fração de material ativo e otimizar as propriedades de transporte (Nie *et al.*, 2021). Eletrodos espessos sinterizados podem proporcionar densidade de energia e capacidade por área superiores em nível de célula, embora apresentem menor aproveitamento da capacidade específica em função de altas taxas de carga e descarga, devido a limitações no transporte iônico e eletrônico (Nie *et al.*, 2021). Assim, a área superficial eletroquimicamente acessível torna-se mais relevante para a engenharia de eletrodos do que a área superficial física total (Qu, 2014).

3 METALURGIA DO PÓ

A MP é uma técnica de fabricação metal-mecânica versátil que utiliza partículas de pós para produzir componentes sólidos com propriedades estruturais e funcionais controladas. Um pó consiste de partículas sólidas cujas dimensões variam de nanômetros a micrômetros, e os processos baseados em pós metálicos, agrupadas sob o termo MP, são amplamente utilizados na produção de peças metálicas complexas com controle preciso de porosidade e geometria (Francis, 2016).

O processo convencional de metalurgia do pó compreende a transformação das partículas metálicas em componentes sólidos por meio de compactação e aquecimento controlado. Inicialmente, os pós metálicos, que podem ser elementares ou ligas pré-formadas, são combinados com aditivos e lubrificantes, formando uma mistura homogênea que facilita o manuseio e melhora a fluidez do particulado durante a compactação. Em seguida, essa mistura é submetida à compactação em moldes sob altas pressões, promovendo

a densificação por deformação plástica localizada das partículas, rearranjo estrutural e preenchimento parcial dos vazios intersticiais. Posteriormente, as peças compactadas são submetidas à sinterização, um tratamento térmico realizado em temperaturas abaixo do ponto de fusão do metal, que favorece a difusão sólida, consolida a estrutura e incrementa a resistência mecânica, resultando em componentes densos e coesos com microestruturas controladas (Rodriguez-Contreras *et al.*, 2021; Francis, 2016).

Materiais sinterizados porosos podem apresentar estrutura isolada e fechada com baixa porosidade, ou estrutura aberta e conectada com alta porosidade. A MP constitui um método versátil para a produção de metais porosos, onde a taxa de poros, o tamanho dos poros e a distribuição do tamanho dos poros dos materiais resultantes podem ser efetivamente controlados (Liu; Chen, 2014).

3.1 TÉCNICA DE *SPACE HOLDER*

As técnicas de SH permitem controlar parâmetros de porosidade, como a morfologia e a fração volumétrica de poros, preservando ao mesmo tempo a resistência mecânica do componente. A combinação da MP com a técnica de SH possibilita a obtenção de peças com altos níveis de porosidade, tipicamente entre 60% e 80%, distribuídos de forma homogênea ao longo de todo seu volume, sendo essa distribuição influenciada pela natureza do material utilizado como SH (Rodriguez-Contreras *et al.*, 2021).

O método de SH baseia-se na incorporação de estruturas voláteis em forma de partículas, como polímeros e sais, na mistura de pós metálicos para atuarem como agentes formadores de poros. A forma, o tamanho e a quantidade das partículas de SH constituem os principais parâmetros de controle e influenciam as características finais da microestrutura porosa, sendo as quantidades de pó metálico e de SH calculadas para atingir a fração de poros desejada (Cavilha Neto *et al.*, 2022). As partículas de SH são removidas por processos químicos ou térmicos, antes ou durante a sinterização, promovendo a formação de uma rede de poros interconectados (Rodriguez-Contreras *et al.*, 2021; Cavilha Neto *et al.*, 2022). A Figura 3 apresenta uma representação esquemática dos efeitos do SH na formação da estrutura porosa.

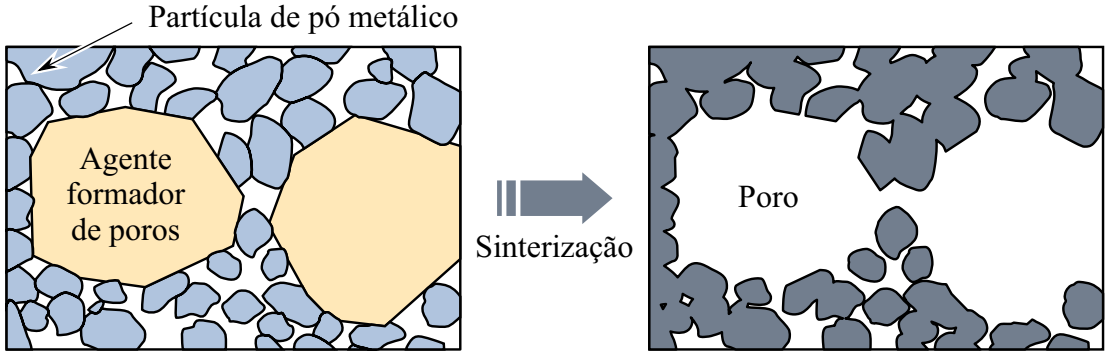


Figura 3 — Representação dos efeitos do método de SH.
Fonte: Ishizaki, Komarneni e Nanko (1998).

Uma ampla variedade de materiais pode ser utilizada como SH, incluindo sais solúveis como carbonato de amônio (NH_4HCO_3), ureia, cloreto de potássio (KCl) e cloreto de amônio (NH_4Cl), polímeros como polimetil metacrilato (PMMA), álcool polivinílico (PVA) e metilcelulose, hidretos metálicos como hidreto de titânio (TiH_2) e outros materiais como esferas metálicas, partículas cerâmicas, cânfora, ácido esteárico, magnésio (Mg) e

cenosferas. Um agente formador de poros ideal deve atender a critérios como baixo custo, fácil remoção, disponibilidade nas formas e tamanhos desejados e estabilidade mecânica sob as pressões de compactação, evitando deformação ou fratura. A remoção completa das partículas de SH é essencial para alcançar a porosidade desejada e evitar a contaminação por partículas de SH residuais. A fração volumétrica do material de SH é determinada de acordo com a porosidade desejada enquanto o tamanho das partículas é escolhido para controlar o tamanho final dos macroporos (Rodriguez-Contreras *et al.*, 2021).

A Figura 4 ilustra os mecanismos de formação de poros através da técnica de SH, evidenciando as diferentes etapas do processo.

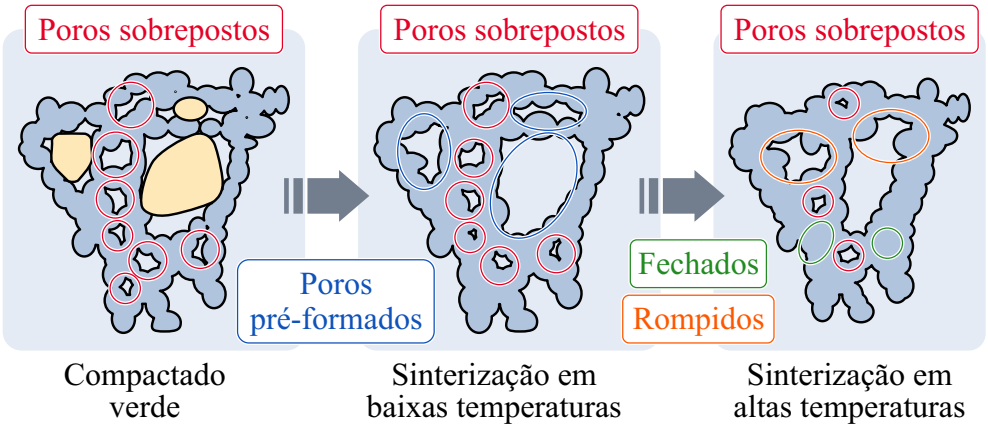


Figura 4 — Mecanismos de formação de poros pelo método de SH.
Fonte: adaptado de Li *et al.* (2020).

O procedimento SH permite o controle da quantidade e forma dos poros assim como o controle dimensional das peças produzidas com baixo custo. Durante o processo, os formadores de poros não interagem quimicamente com o metal e são facilmente removidos em etapas posteriores. A porosidade é regulada pela quantidade e pela forma do SH adicionado e, de modo geral, a sua remoção é realizada por ação térmica ou solventes (Cavilha Neto *et al.*, 2022).

3.2 ETAPAS DO PROCESSO COM *SPACE HOLDER*

O método de SH inicia-se com mistura para a homogeneização do pó da matriz metálica e das partículas formadoras de poros. A seleção e o preparo adequados das partículas de pó metálico são essenciais antes do início da fabricação, pois as propriedades do material poroso final dependem diretamente das características dos materiais precursores (Arifvianto; Zhou, 2014). A Figura 5 apresenta um esquema detalhado da rota completa de fabricação utilizando a técnica de SH.

Existem duas técnicas que podem ser usadas para o preparo de pós de liga, nomeadamente a técnica de pré-liga, em que um ou mais elementos são incorporados ao metal base antes da atomização do pó, e a técnica de elementos misturados, que envolve a mistura de partículas de diferentes pós elementares, por exemplo, em um moinho de bolas planetário (Arifvianto; Zhou, 2014).

O uso de partículas de pó com geometria angular proporciona maior resistência verde, enquanto compactados obtidos a partir de partículas esféricas apresentam tendência a colapsar, especialmente durante a remoção do SH, devido ao menor intertravamento mecânico entre as partículas inicialmente esféricas (Arifvianto; Zhou, 2014).

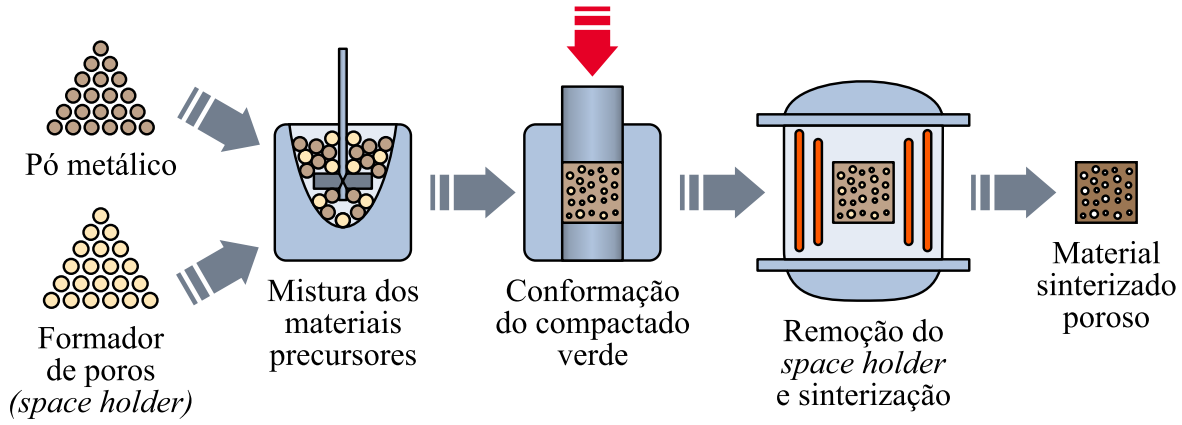


Figura 5 — Esquema ilustrativo da rota de fabricação com o método de SH.
Fonte: adaptado de Arifvianto e Zhou (2014).

A compactação é realizada após a mistura para conferir resistência verde suficiente, mantendo a integridade da mistura de pó da matriz metálica e partículas de espaço durante as etapas subsequentes, de remoção do SH e de sinterização. As técnicas de compactação compreendem compactação uniaxial em matriz, compactação isostática e moldagem por injeção (MIM), podendo ser conduzidas à temperatura ambiente, a compactação a frio, ou em temperaturas elevadas, por *hot pressing* (Arifvianto; Zhou, 2014).

Duas técnicas são comumente empregadas para remoção do SH, por tratamento térmico ou por lixiviação em líquido. A remoção térmica baseia-se na decomposição e evaporação do material formador de espaço a temperaturas superiores à sua temperatura de decomposição específica. A determinação da temperatura ideal para remoção completa do SH é frequentemente realizada por ensaio de análise térmica (Arifvianto; Zhou, 2014).

A sinterização é realizada em altas temperaturas, promovendo a coalescência das partículas da matriz metálica nas pré-formas compactadas. Esse processo pode ser realizado em ciclo único, incluindo um patamar inicial para remoção do SH. A temperatura de sinterização é definida em função da temperatura de fusão do material, sendo que a faixa otimizada situa-se entre 60 e 80% da sua temperatura de fusão (Cavilha Neto *et al.*, 2022).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A matéria-prima principal utilizada neste estudo corresponde ao pó de ferro atomizado em água, comercialmente denominado ASC 100.29 e produzido pela empresa sueca Höganäs ®. Esse material apresenta pureza química superior a 99,91%, elevada compressibilidade e partículas de morfologia predominantemente irregular, conforme imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura (MEV) mostrada na Figura 6. A combinação dessas características favorecem a compactabilidade do pó, promovendo a formação de compactados verdes mais homogêneos.

A análise granulométrica foi conduzida por difração a laser, sendo o histograma de distribuição de tamanhos de partículas apresentada na Figura 7. As partículas do pó de ferro apresentaram diâmetros variando entre 0,2 e 300 μm, com valor médio de 98,64 μm. Na distribuição acumulada, verificou-se que 10% do particulado possui diâmetro inferior a 40,22 μm, 50% encontra-se em 93,03 μm e 90% apresenta diâmetro inferior a 164,31 μm. A densidade aparente do material, conforme informado pelo fabricante, é de 2,98 g/cm^3.

Como SH, foi empregado álcool polivinílico (PVA) em pó, fornecido pela empresa

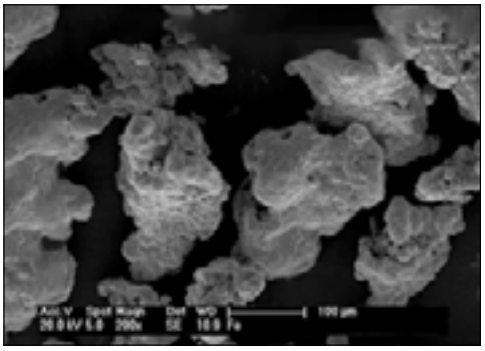


Figura 6 — Partículas do pó de ferro ASC 100.29 analisada por MEV.

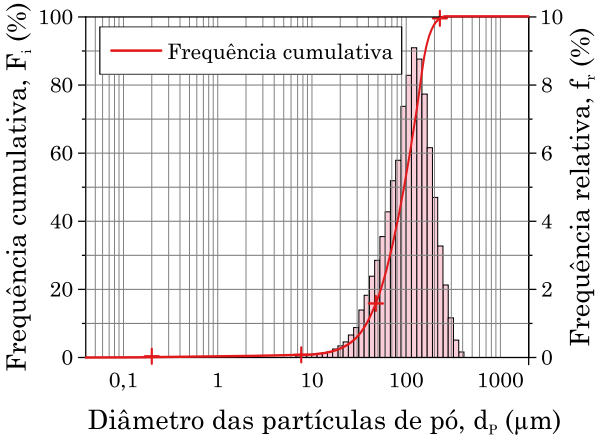


Figura 7 — Distribuição granulométrica do pó de ferro ASC 100.29.

Neon Reagentes Analíticos, com densidade aparente de 1,27 g/cm^3, cuja aparência é apresentada na Figura 8. O PVA exerce papel fundamental no processo, desempenhando função dupla ao atuar inicialmente como ligante orgânico, conferindo resistência mecânica aos compactos na condição verde, e ao promover a formação de poros interconectados após sua decomposição térmica durante o ciclo de sinterização.

Figura 8 — Aparência amostral do álcool polivinílico.

O PVA foi previamente moído em moinho planetário da marca Retsch ®, modelo PM-100, operando a 140 rpm por 15 min com o objetivo de reduzir aglomerados e uniformizar a granulometria. Após a moagem, o pó foi classificado por agitação magnética em peneira de 100 *mesh*, cerca de 150 μm, eliminando partículas grosseiras remanescentes e garantindo uma distribuição granulométrica mais fina e homogênea.

Duas composições distintas de pós metálicos foram preparadas, sendo a primeira

composta por pó de ferro com adição de 1% em massa de estearato de zinco como lubrificante, enquanto a segunda incluiu adicionalmente 10% em massa de PVA. A homogeneização das misturas foi realizada em misturador do tipo duplo cone por 30 min, assegurando dispersão uniforme do lubrificante e do SH.

A compactação dos pós ocorreu em matriz cilíndrica de aço ferramenta austenítico AISI D6 com diâmetro interno de 13 mm, obtendo-se corpos verdes de 3 mm de espessura, utilizando prensa hidráulica da marca Marcon ®, modelo MPH-15, sob pressões uniaxiais de 60, 80, 100 e 120 MPa. Os parâmetros de composição, pressão de compactação e temperatura de sinterização das amostras estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros de processamento das amostras sinterizadas.

Identificação da amostra	**Composição do material**	**Pressão de compactação, P_C [MPa]**	**Temperatura de sinterização, ϑ_S [°C]**
1	Fe	60	1.050
2	Fe	80	1.050
3	Fe	100	1.050
4	Fe	120	1.050
5	Fe + 10% PVA	60	1.050
6	Fe + 10% PVA	80	1.050
7	Fe + 10% PVA	100	1.050
8	Fe + 10% PVA	120	1.050

Os compactados verdes foram sinterizados em forno resistivo horizontal do tipo mufla, fabricado pela empresa Sanchis Fornos Industriais ®, modelo Tubular 1600, com vácuo prévio e sob atmosfera de argônio puro em pressão positiva de 0,6 bar e vazão volumétrica de 2 L/min como gás de arraste, visando minimizar a oxidação devido à reatividade do material. O ciclo térmico, representado na Figura 9, compreendeu dois patamares, adotando taxa de aquecimento de 10 °C/min, sendo o primeiro destinado à remoção do PVA a 300 °C, mantido por 15 min, e o segundo à sinterização do ferro a 1.050 °C, com patamar mantido por 30 min e posterior resfriamento controlado até a temperatura ambiente.

As propriedades físicas foram determinadas a partir da densidade absoluta das amostras sinterizadas, ρ_S (g/cm^3), aplicando-se o princípio de Arquimedes conforme as normas MPIF Standard 42 e ASTM B962-17. A densidade absoluta foi calculada segundo a Equação 1, a partir da massa e do volume de fluido deslocado pelas amostras quando imersas em líquido de densidade conhecida.

$$\rho_S = \left(\frac{m_S}{m_S - m_I} \right) \cdot \rho_L \tag{1}$$

Onde:
ρ_S é a densidade absoluta do sinterizado, em g/cm^3;
m_S é a massa seca do sinterizado, em g;

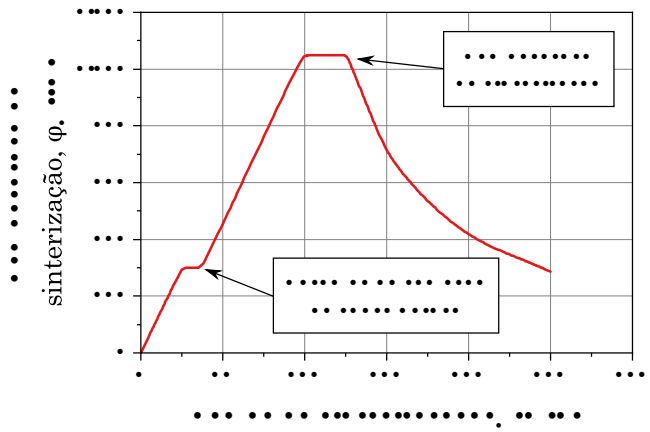


Figura 9 — Perfil térmico do ciclo de sinterização adotado.

m_I é a massa imersa do sinterizado, em g;
ρ_L é a densidade do líquido em que o sinterizado é imerso, em g/cm^3.

A porosidade absoluta das amostras sinterizadas, ρ_S (%), foi estimada utilizando a Equação 2, relacionando a densidade absoluta com a densidade teórica do material, ρ_T (g/cm^3), que para o ferro é cerca de 7,87 g/cm^3.

$$\phi_S = \left(1 - \frac{\rho_S}{\rho_T}\right) \cdot 100 \tag{2}$$

Onde:
ϕ_S é a porosidade absoluta do sinterizado, em %;
ρ_S é a densidade absoluta do sinterizado, em g/cm^3;
ρ_T é a densidade teórica do material, em g/cm^3.

Em complemento, a morfologia superficial foi investigada por microscopia eletrônica de varredura (MEV) utilizando equipamento da marca JEOL ®, modelo JSM 6510-LV, operando a uma tensão de 20 kV, acoplado a um sistema de espectroscopia de energia dispersiva de raios X (EDS) da marca Noran ®, o qual permitiu a determinação da composição elementar das amostras sinterizadas.

A análise de fases foi realizada por difração de raios X (DRX) em difratômetro da marca Phillips ®, modelo X'Pert MPD, com radiação CuKα e comprimento de onda de 1,5418 Å. O equipamento operou sob tensão de aceleração de 40 kV, realizando varredura angular em um ângulo 2θ no intervalo de 20° a 80°, com passo de 0,05° e um tempo de aquisição de 1 segundo. Os difratogramas foram processados no *software* X'Pert HighScore Plus, utilizando dados do Crystallography Open Database (COD) para correlacionar os picos identificados, possibilitando a investigação da formação de fases secundárias durante a sinterização, bem como a avaliação da pureza da matriz metálica.

Ensaios de microdureza Vickers, μHV ($HV_{0,5\ kgf}$), foram realizados seguindo as recomendações da norma MPIF Standard 51, específica para caracterização de componentes fabricados por MP. As medições foram efetuadas em microdurômetro digital Shimadzu ®, modelo HMV 2000, utilizando penetrador de diamante tipo pirâmide e carga de 0,5 kgf aplicada por 15 s, em conformidade com a norma ASTM E384-17 para microindentações de materiais. Foram realizadas três indentações em diferentes regiões de cada amostra,

correspondentes ao raio interno, médio e externo, sendo a média dos valores obtidos utilizada para comparação entre os corpos convencionais e aqueles contendo PVA como SH. A análise permitiu correlacionar a presença de porosidade induzida pelo PVA com a resistência mecânica local da matriz sinterizada, considerando as diferentes pressões de compactação investigadas.

5 RESULTADOS

A densidade absoluta das amostras sinterizadas, determinada pelo método de Arquimedes, variou de 4,94 a 6,73 g/cm^3 para as amostras obtidas por MP, enquanto para aquelas produzidas pelo método SH os valores situaram-se entre 3,56 e 4,59 g/cm^3. Conforme apresentado na Figura 10, em ambas as rotas de processamento verificou-se uma tendência de crescimento da densidade final com o aumento da pressão de compactação, comportamento este associado à maior eficiência de empacotamento das partículas durante a etapa de compactação. Contudo, mesmo sob condições equivalentes de pressão, os eletrodos processados por MP convencional apresentaram densidades significativamente superiores às registradas nos eletrodos obtidos pelo método SH contendo 10% de PVA.

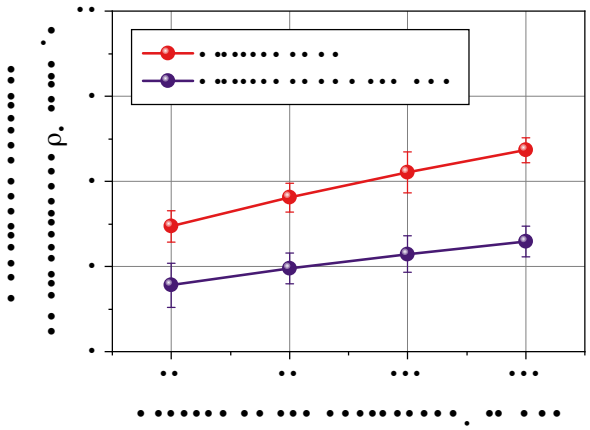


Figura 10 — Densidade absoluta das amostras em função da pressão de compactação.

Na Figura 11 são apresentados os resultados de porosidade das amostras sinterizadas. Para as amostras obtidas por MP convencional, a porosidade variou de 37,2% na compactação a 60 MPa para 14,6% na compactação a 120 MPa. Por sua vez, para aquelas fabricadas pelo método SH com adição de PVA, os valores situaram-se entre 54,7% e 41,6%, para pressões de 60 e 120 MPa, respectivamente.

Observa-se que as amostras processadas pelo método SH apresentaram porosidade significativamente superior em comparação às obtidas por MP sob as mesmas condições de compactação, representando incrementos relativos de 47,0% a 60 MPa e de 184,9% a 120 MPa. Esse comportamento confirma o papel do PVA como agente formador de poros, cuja decomposição e remoção durante a sinterização promove a geração de vazios intencionais na matriz metálica, resultando em redução substancial da densidade absoluta. Dessa forma, a introdução controlada do agente formador permite modular a fração volumétrica de porosidade sem comprometer a conformação global do pó, exercendo efeito direto sobre a microestrutura. Em síntese, embora o aumento da pressão de compactação favoreça a densificação das amostras, a presença do PVA exerce influência predominante na determinação da porosidade, na estabilidade dimensional e na contração volumétrica,

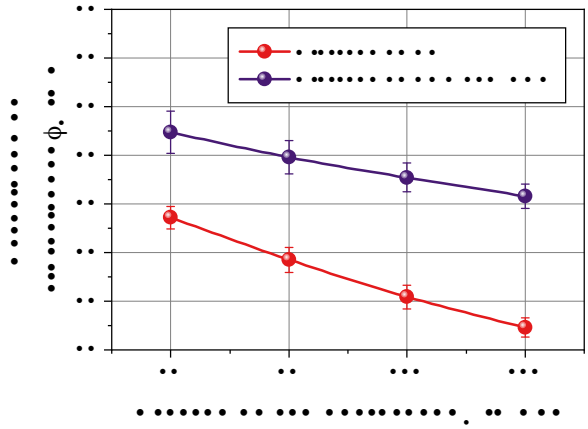


Figura 11 — Porosidade das amostras em função da pressão de compactação.

impactando de maneira significativa os mecanismos de sinterização e consolidação do material.

As micrografias obtidas por MEV, apresentadas na Figura 12, revelam diferenças estruturais marcantes entre as amostras obtidas nas distintas condições de processamento.

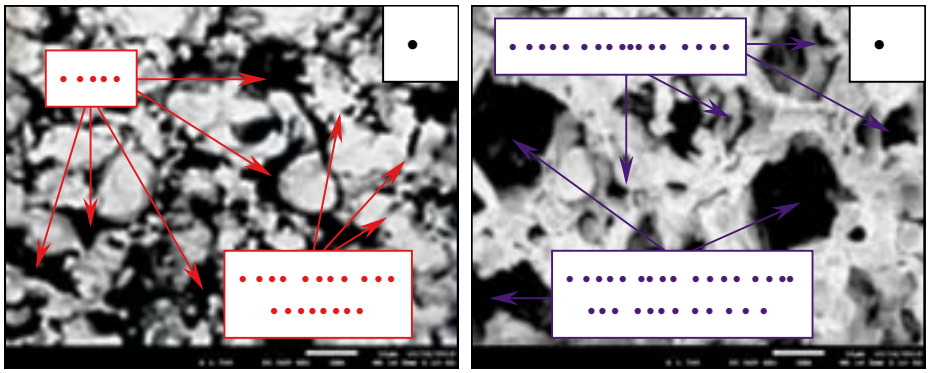


Figura 12 — Microscopias eletrônicas de varredura das amostras dos eletrodos.
A) Amostra obtida por MP; **B)** Amostra obtida pelo método de SH.

A amostra fabricada por MP apresenta uma estrutura caracterizada pela predominância de microporos, cuja sobreposição gera canais interconectados, resultado do empacotamento e da sinterização das partículas de ferro, o que promove elevado contato superficial entre elas, favorece os mecanismos de consolidação da estrutura por meio da formação de pescoços e amplia a área superficial ativa. Em contraste, a amostra obtida pelo método de SH exibe uma arquitetura de poros dupla e hierárquica, na qual macroporos regulares, decorrentes da remoção das partículas de PVA, são circundados por paredes celulares que contêm uma rede de microporos, evidenciando o papel do espaçador na definição da microestrutura e na formação de uma rede porosa hierárquica.

A análise da composição química por EDS, apresentada na Figura 13, complementa as observações de MEV, evidenciando os principais elementos presentes e permitindo relacionar sua distribuição com a microestrutura das amostras.

O ferro é o elemento químico predominante nas amostras, com os picos característicos Fe-Lα e Fe-Kα confirmando a presença da matriz metálica base, além da linha secundária Fe-Kβ observada na amostra produzida pelo método de SH. A ausência de outros elementos indica que a integridade da matriz metálica não foi comprometida e que o PVA utilizado

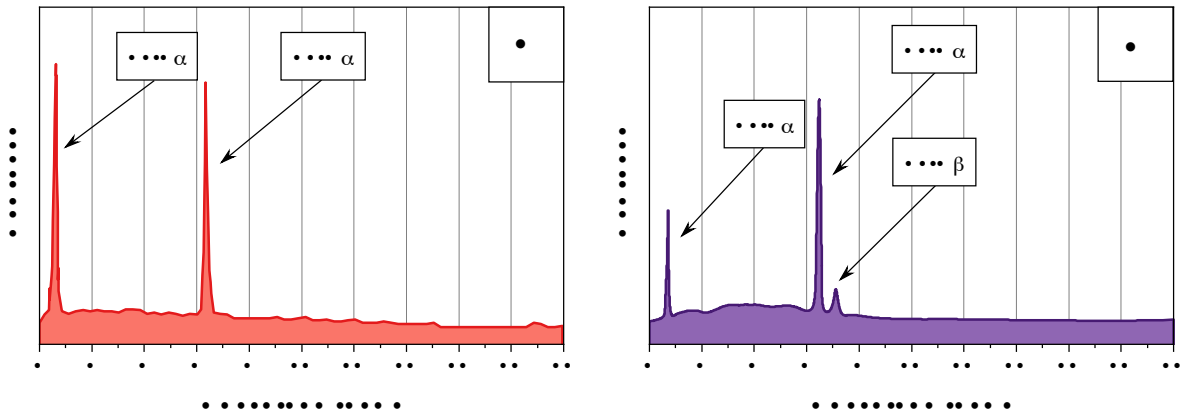


Figura 13 — Espectroscopias de raios X por dispersão de energia das amostras. **A)** Amostra obtida por MP; **B)** Amostra obtida pelo método de SH.

no processamento foi completamente removido durante a sinterização, sem deixar resíduos. Na amostra obtida por MP, a presença de oxigênio foi apenas indicativa, sugerindo possível oxidação superficial pós-sinterização, possivelmente durante o manuseio, mas em níveis abaixo do limite de detecção, sem evidências de formação de fases oxidadas ou de contaminação significativa.

Os difratogramas de DRX, apresentados na Figura 14, permitem a identificação dos picos característicos das fases cristalinas presentes nas amostras. Pequenos deslocamentos desses picos em relação aos padrões cristalográficos podem ser atribuídos a tensões residuais induzidas pelo processo de sinterização, sem, contudo, comprometer a estrutura cristalina do material.

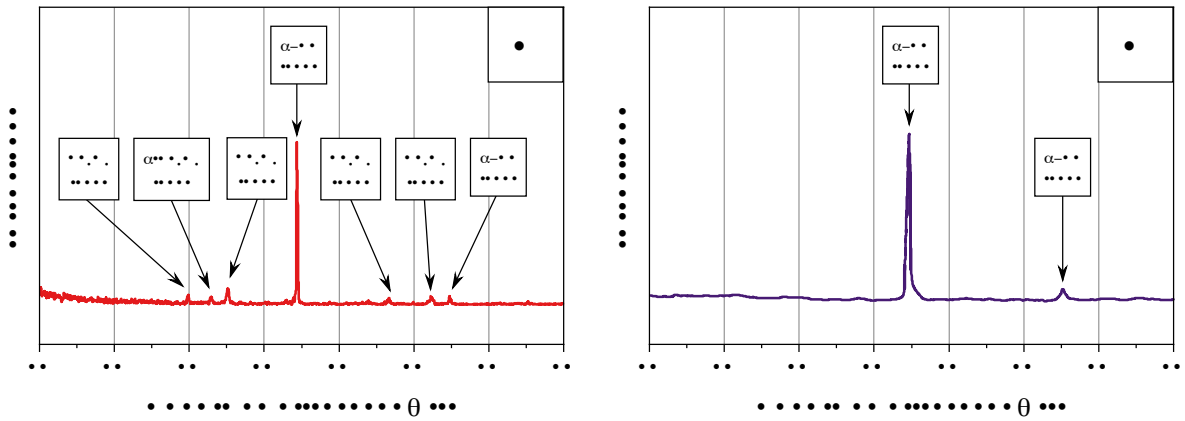


Figura 14 — Espectros de difração de raios X das amostras dos eletrodos. **A)** Amostra obtida por MP; **B)** Amostra obtida pelo método de SH.

A análise dos difratogramas revelou que, tanto para as amostras obtidas por MP quanto pelo método SH, o pico principal em 44,4° é característico da fase ferrítica (α-Fe), correspondente ao plano cristalográfico (110) da estrutura cúbica de corpo centrado (CCC). Em ambas as condições, observou-se ainda um pico secundário em 64,7°, associado à α-Fe e referente ao plano (200). Na amostra obtida por MP, foram identificados picos adicionais relacionados à formação de óxidos de ferro, destacando-se a presença de magnetita (Fe_3O_4), evidenciada pelos picos em 29,8° de plano (220), 35,2° de plano (311), 56,7° de plano

(511) e 62,3° de plano (440). Além disso, verificou-se a ocorrência de hematita (α-Fe_2O_3), indicada pelo pico em 32,9° e plano cristalográfico (104).

A formação de fases oxidadas em menor quantidade nas amostras fabricadas por MP pode estar associada à oxidação superficial, decorrente da retirada do forno e da subsequente exposição ao ar em temperaturas próximas de 400 °C, fenômeno relatado por Bai *et al.* (2019) e Gonçalves *et al.* (2020), e condicionado pelas variáveis de atmosfera e taxa de resfriamento.

A análise da microdureza Vickers em função da pressão de compactação, apresentada na Figura 15, evidenciou uma relação diretamente proporcional para ambas as condições de processamento.

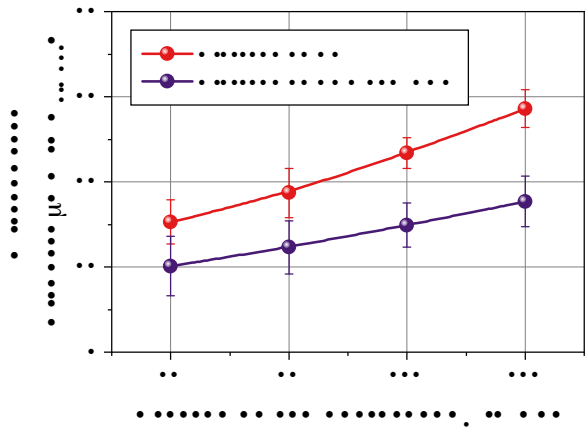


Figura 15 — Microdureza das amostras em função da pressão de compactação.

A amostra de eletrodo produzida por MP apresentou microdureza superior em toda a faixa de pressão, variando de 15,3 a 28,6 $HV_{0,5\ kgf}$ para pressões de 60 a 120 MPa. Em contraste, a amostra obtida pelo método de SH apresentou valores significativamente menores, entre 10,1 e 17,7 $HV_{0,5\ kgf}$, na mesma faixa de pressão. Como esperado, essa diferença é atribuída à presença de poros adicionais introduzidos pelo PVA e às distintas dinâmicas de consolidação durante a sinterização, que resultam em menor densidade e, consequentemente, menor resistência à deformação plástica.

Além disso, a densificação mostrou-se mais eficiente com o aumento da pressão de compactação, ampliando a diferença entre os valores de microdureza obtidos pelos dois métodos. Esses resultados corroboram a importância da densificação na melhoria das propriedades mecânicas, uma vez que pressões elevadas favorecem a uniformidade da microestrutura e aumentam a resistência à deformação plástica.

6 CONCLUSÃO

A síntese de eletrodos de ferro porosos por MP mostrou-se viável, com ênfase na adição de PVA como agente formador de poros pelo método de SH e na variação da pressão de compactação. A incorporação de PVA resultou em aumento significativo da porosidade, promovendo a formação de poros interconectados e uma distribuição mais homogênea, enquanto os corpos sinterizados pela rota convencional de MP apresentaram menor porosidade e poros de geometria menos uniforme.

A variação da pressão de compactação exerceu efeito direto sobre a densidade relativa dos corpos, de modo que pressões mais elevadas favoreceram a consolidação do

material, mas, consequentemente, reduziram a porosidade total. Observou-se, ainda, que o incremento da porosidade esteve associado à redução da microdureza, evidenciando a relação entre a formação de poros e a resistência mecânica dos corpos sinterizados.

Os resultados demonstram que os controles da concentração de PVA e da pressão de compactação possibilitam ajustar de forma precisa a microestrutura, a porosidade e a microdureza dos eletrodos de ferro porosos, evidenciando a eficácia da abordagem baseada na técnica de SH e fornecendo subsídios relevantes para o desenvolvimento de materiais metálicos altamente porosos voltados a aplicações eletroquímicas, como a constituição de materiais ativos de eletrodos para armazenamento de energia.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) ao fomento científico e às pesquisas desenvolvidas no Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), a equipe de pesquisadores, técnicos e empresas parceiras do Centro Brasileiro de Inovação em Conformação Mecânica (CBCM).

REFERÊNCIAS

ARIFVIANTO, B.; ZHOU, J. Fabrication of metallic biomedical scaffolds with the space holder method: a review. **Materials**, Basileia, v. 7, n. 5, p. 3588–3622, 2014.

AYUB, H. *et al.* Investigating the morphology, hardness, and porosity of copper filters produced via hydraulic pressing. **Journal of Materials Research and Technology**, Amesterdã, v. 19, p. 208–219, 2022.

BAI, Y. *et al.* Preparation of graphene-carbonyl iron powder@tri-iron tetroxide composite and its better microwave absorption properties. **Journal of Materials Science: Materials in Electronics**, Dordrecht, v. 30, p. 5454–5463, 2019.

BĘTKOWSKA, A. *et al.* Microstructure and mechanical properties of highly porous Hastelloy-X nickel superalloy produced by a space holder approach. **Scientific Reports**, Berlim, v. 15, n. 1, p. 598, 2025.

CAVILHA NETO, F. *et al.* An overview of highly porous titanium processed via metal injection molding in combination with the space holder method. **Metals**, Basileia, v. 12, n. 5, p. 783, 2022.

CUI, G. *et al.* Manufacturing of high porosity iron with an ultra-fine microstructure via free pressureless spark plasma sintering. **Materials**, Basileia, v. 9, n. 6, p. 495, 2016.

DUKHAN, N. *et al.* Porous metals: from nano to macro. **Journal of Materials Research**, Heidelberg, v. 35, n. 19, p. 2529–2534, 2020.

FRANCIS, L. F. Powder processes. *In:* FRANCIS, L. F. **Materials processing**. Amesterdã: Elsevier, 2016. cap. 5, p. 343–414.

GONÇALVES, A. H. A. *et al.* Synthesis of a magnetic Fe_3O_4/RGO composite for the rapid photo-fenton discoloration of indigo carmine dye. **Topics in Catalysis**, Nova Iorque, v. 63, p. 1017–1029, 2020.

ISHIZAKI, K.; KOMARNENI, S.; NANKO, M. **Porous materials**: process technology and applications. 1. ed. Dordrecht: Springer, 1998. 240 p.

JANG, E. S.; KANG, C. W. An experimental study on pore structural changes of ultrasonic treated Korean paulownia *(Paulownia coreana)*. **Wood Science and Technology**, Nova Iorque, v. 56, n. 3, p. 883–898, 2022.

JHA, N. *et al.* Highly porous open cell Ti-foam using NaCl as temporary space holder through powder metallurgy route. **Materials and Design**, Londres, v. 47, p. 810–819, 2013.

LI, H. *et al.* Preparation of nickel porous materials by sintering nickel oxalate and sodium chloride after blending and reduction. **Journal of Materials Research and Technology**, Amesterdã, v. 9, n. 3, p. 3149–3157, 2020.

LIU, P.; CHEN, G. -F. **Porous materials**: processing and applications. 1. ed. Kidlington: Butterworth-Heinemann, 2014. 560 p.

NEWMAN, J.; TIEDEMANN, W. **Porous-electrode theory with battery applications**. Berkeley: Lawrence Berkeley Laboratory, University of California, 1974. 81 p.

NIE, Z. *et al.* Pore microstructure impacts on lithium ion transport and rate capability of thick sintered electrodes. **Journal of The Electrochemical Society**, Pennington, v. 168, n. 6, p. 60550, 2021.

QU, D. Fundamental principals of battery design: porous electrodes. *In:* INTERNATIONAL CONFERENCE OF ELECTROCHEMICAL STORAGE, 1., 2014, Freiberga. **AIP Conference Proceedings**. Melville: American Institute of Physics, 2014. p. 14–25.

RODRIGUEZ-CONTRERAS, A. *et al.* Powder metallurgy with space holder for porous titanium implants: a review. **Journal of Materials Science and Technology**, Pequim, v. 76, p. 129–149, 2021.

ROUQUÉROL, J. *et al.* Guidelines for the characterization of porous solids. **Studies in Surface Science and Catalysis**, Amesterdã, v. 87, n. 100, p. 1–9, 1994.

SANTHANAGOPALAN, S.; WHITE, R. E. Porous electrodes. *In:* GARCHE, J. **Encyclopedia of electrochemical power sources**. Amesterdã: Elsevier, 2009. p. 110–120.

SATHAIAH, S. *et al.* Effect of spherical and cubical space holders on the microstructural characteristics and its consequences on mechanical and thermal properties of open-cell aluminum foam. **Materials Chemistry and Physics**, Lausana, v. 273, p. 125115, 2021.

WANG, Z. *et al.* Fabrication of three-dimensional porous Cu current collector for lithium-ion batteries using space holder method. **International Journal of Electrochemical Science**, Amesterdã, v. 16, n. 6, p. 1–12, 2021.

YANG, Q. *et al.* Porous electrode materials for Zn-ion batteries: from fabrication and electrochemical application. **Batteries**, Basileia, v. 8, n. 11, p. 223, 2022.

YANPING, H. *et al.* Effects of the space holder size on the pore structure and mechanical properties of porous Cu with a wide porosity range. **Scientific Reports**, Berlim, v. 15, n. 1, p. 11072, 2025.

ZHAO, B. *et al.* A review on metallic porous materials: pore formation, mechanical properties, and their applications. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Londres, v. 95, n. 5-8, p. 2641–2659, 2018.

ZHOU, X. *et al.* A high-performance dual-scale porous electrode for vanadium redox flow batteries. **Journal of Power Sources**, Amesterdã, v. 325, p. 329–336, 2016.

44º SENAFOR

28ª Conferência Internacional de Forjamento - Brasil
14ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas / 11º Congresso do BrDDRG
14ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis
3ª Conferência Internacional de Inovação em Materiais e Manufatura
Porto Alegre, RS, dias 1, 2 e 3 de outubro de 2025
www.senafor.com

DETERMINATION OF DISLOCATION NUCLEATION IN SILICON FROM SOLIDIFICATION ALONG DIFFERENT DIRECTIONS USING MOLECULAR DYNAMICS

Matías Gonzalez [1]
Fernando Benitez [1,2]
[1] Universidad Nacional de Asunción – Facultad Politécnica – San Lorenzo, Paraguay
[2] Instituto de Pesquisas Energeticas e Nucleares – São Paulo – Brasil

ABSTRACT

Silicon is considered one of the most important materials for technological applications such as semiconductors, where crystalline defects like dislocations are detrimental to its electrical properties. With the modified Tersoff potential, molecular dynamics simulations were carried out to study the formation of dislocations during crystal solidification along different crystallographic directions ⟨100⟩, ⟨110⟩, ⟨111⟩, and ⟨112⟩, comparing single and dual growth fronts. The identification, quantification, and characterization of the generated dislocations were performed using the Dislocation Extraction Algorithm. The results revealed a strong dependence between growth orientation and the density and type of dislocations, identifying the ⟨111⟩ orientation as the most prone to dislocation generation. The ⟨100⟩ and ⟨110⟩ orientations exhibited a lower defect density. In the dual-front configuration, dislocation loops were formed in the collision zones, with ⟨100⟩ and ⟨112⟩ showing dislocations loops. These observations open future avenues for defect control and performance enhancement in various crystalline silicon applications.

Keywords - Molecular Dynamics, Silicon, Dislocation Nucleation, Directional Solidification, Crystalline Defects.

1. INTRODUCTION

Silicon (Si) is the foundation of the photovoltaic industry, where its performance is directly related to its crystalline quality. Extended defects such as dislocations degrade electrical properties by introducing deep-level states that act as recombination centers

for minority carriers, reducing device efficiency [1], [2]. It has been reported that these dislocations can cause efficiency losses of 3-4 percentage points in silicon solar cells [3].

The experimental characterization of dislocation nucleation during solidification presents a challenge due to the small spatial and temporal scales involved [4]. The defects generated at the solidification front act as multiplication sources that determine the final crystal quality [3]. Molecular Dynamics (MD) emerges as an essential computational tool for modeling these phenomena at the atomic level [5].

The anisotropy of the cubic diamond structure of silicon implies that its response during solidification is dependent on the crystallographic orientation [6], [7]. This work employs molecular dynamics simulations in LAMMPS with the modified Tersoff potential by Kumagai [8] to investigate dislocation nucleation during the directional solidification of silicon.

2. METHODS

MD simulations were performed using the LAMMPS package [15]. The Tersoff potential [16] has been shown to be appropriate for modeling silicon in simulation studies of defects formation in silicon growth from melt [7]. Atomic interactions were described using the Tersoff potential modified by Kumagai [8]. This modified parameter set provides a more accurate description of silicon's elastic constants and melting point compared to the original Tersoff potential. A simulation cell was constructed consisting of a crystal seed formed by approximately 25000 silicon atoms arranged in a cubic diamond structure and a molten bath of 76800 atoms, extending approximately 18 nm along the Z axis and 10 nm along the X and Y axes. The crystalline seed was oriented so that the Z-axis of the simulation cell aligned with the studied growth crystallographic directions: ⟨100⟩, ⟨110⟩, ⟨111⟩, and ⟨112⟩. The melt was obtained through a pre-simulation involving the melting of a silicon crystal. The total system size was chosen such that the results would not vary in significantly larger systems. The directional solidification process was simulated in an NPT ensemble, using the Nosé-Hoover thermostat and barostat method [9] to control temperature and pressure. The pressure was set to 1 bar. The molten system, initially at 1700 K, was cooled down to 300 K over two total time intervals (6 ns and 8 ns).

To study the effect of the growth front configuration, periodic boundary condition was applied along X and Y axes, and two setups were implemented (Figure 1). Single-front (SF): Fixed boundary conditions were used along the Z-axis, with the walls sufficiently distant to prevent atom-wall interactions, allowing the growth of a single solidification front. Dual-front (DF): Periodic boundary conditions were applied along the Z-axis, allowing the seed to interact with its replicated images and thus promoting two solidification fronts that grow and collide. The identification, characterization, and quantification of dislocations in the resulting atomic configurations were performed using the Dislocation Extraction Algorithm (DXA) [10].

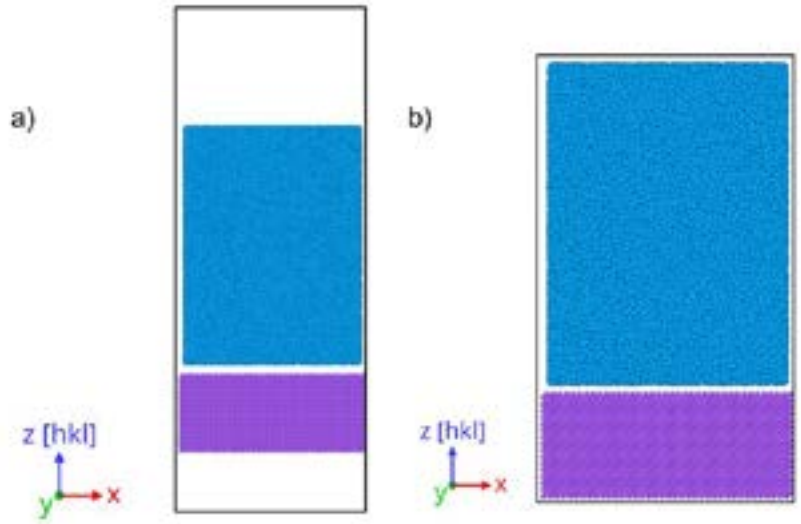


Figure 1: Solidification system configurations: seed (purple), molten silicon (blue). a) SF configuration; b) DF configuration

3. RESULTS

Analysis using the Dislocation Extraction Algorithm (DXA) confirmed the nucleation of dislocations characteristic of the cubic diamond structure of silicon. Perfect dislocations (1/2⟨110⟩), Shockley partial dislocations (1/6⟨112⟩), stair-rod dislocations (1/6⟨110⟩), Frank partial dislocations (1/3⟨111⟩), and dislocations not classified into standard categories were identified.

The dislocation density in the single-front configuration varied with crystallographic orientation. As shown in figure 2, the ⟨100⟩ and ⟨110⟩ orientations exhibited the lowest densities, while the ⟨111⟩ orientation recorded the highest values, reaching 0.172 nm^{-2} at 6 ns and 0.235 nm^{-2} at 8 ns. The ⟨112⟩ orientation showed an intermediate density of 0.0046 nm^{-2} at 6 ns.

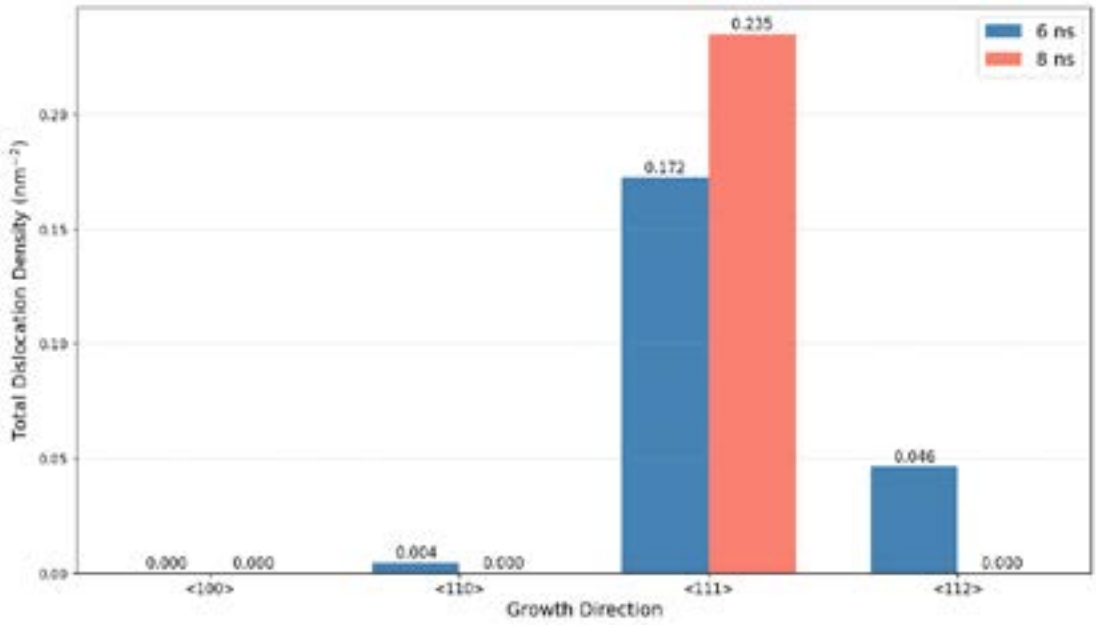


Figure 2: Total dislocation density for each orientation with SF.

For the dual-front configuration, Figure 3 shows a similar trend, with the highest dislocation density in the ⟨111⟩ orientation. The ⟨100⟩ and ⟨112⟩ orientations presented

moderate values, and the ⟨110⟩ orientation showed the lowest density, with 0.002 nm^{-2} at 6 ns and 0.003 nm^{-2} at 8 ns.

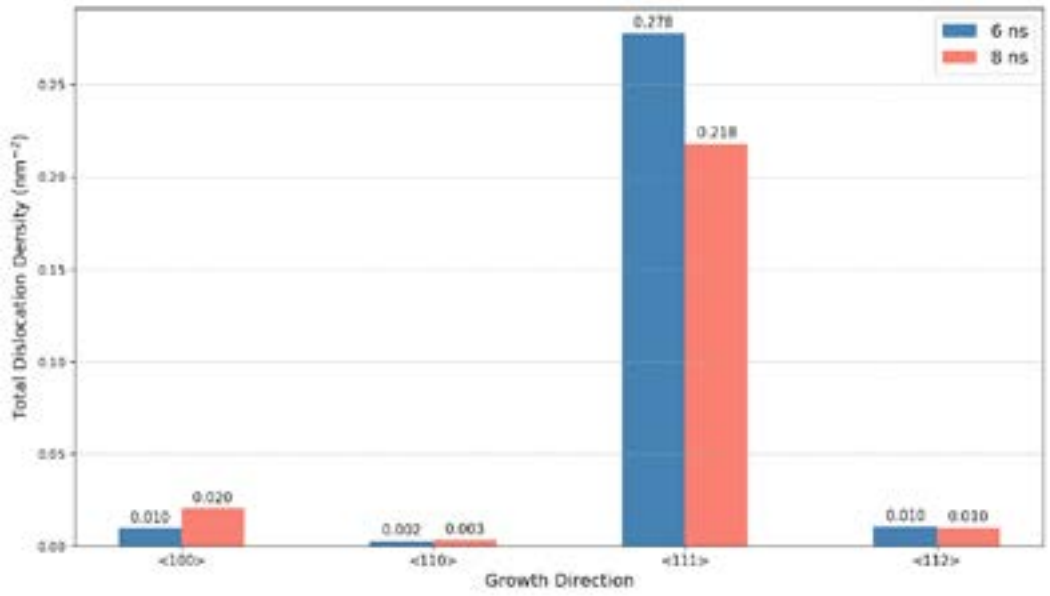


Figure 3: Total dislocation density for each orientation with DF.

The direct comparison between both configurations at 6 ns, shown in Figure 4, revealed that the dual-front configuration generated a higher dislocation density in the ⟨100⟩ and ⟨111⟩ orientations, but a lower density in the ⟨110⟩ and ⟨112⟩ orientations. As shown in Figure 5 at 8 ns, the dual-front configuration resulted in a lower dislocation density only for the ⟨112⟩ orientation, with higher densities for the other orientations compared to the single-front configuration.

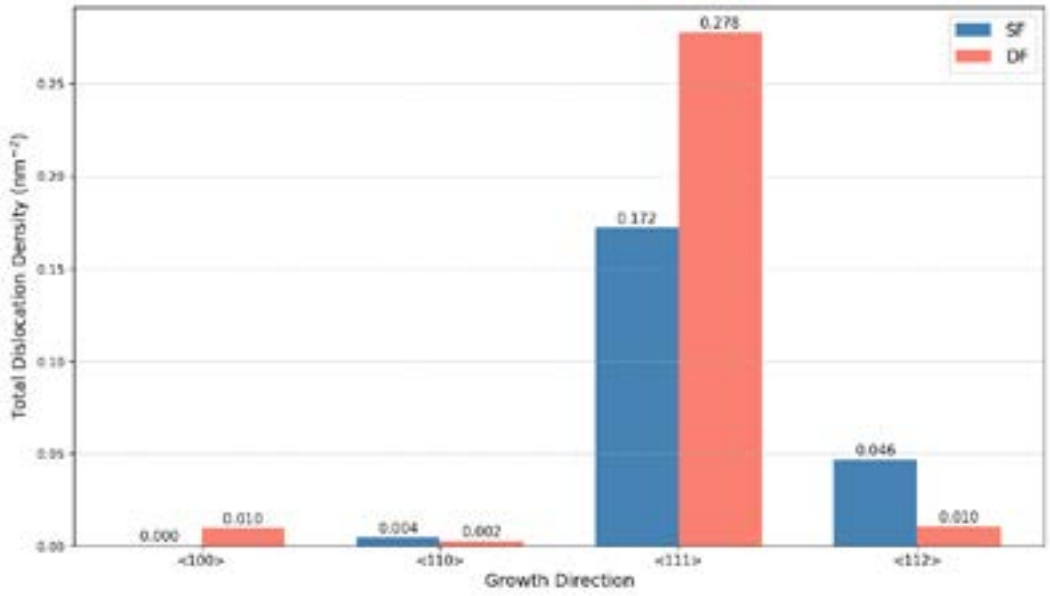


Figure 4: Total dislocation density by growth orientation for SF and DF after 6 ns of cooling.

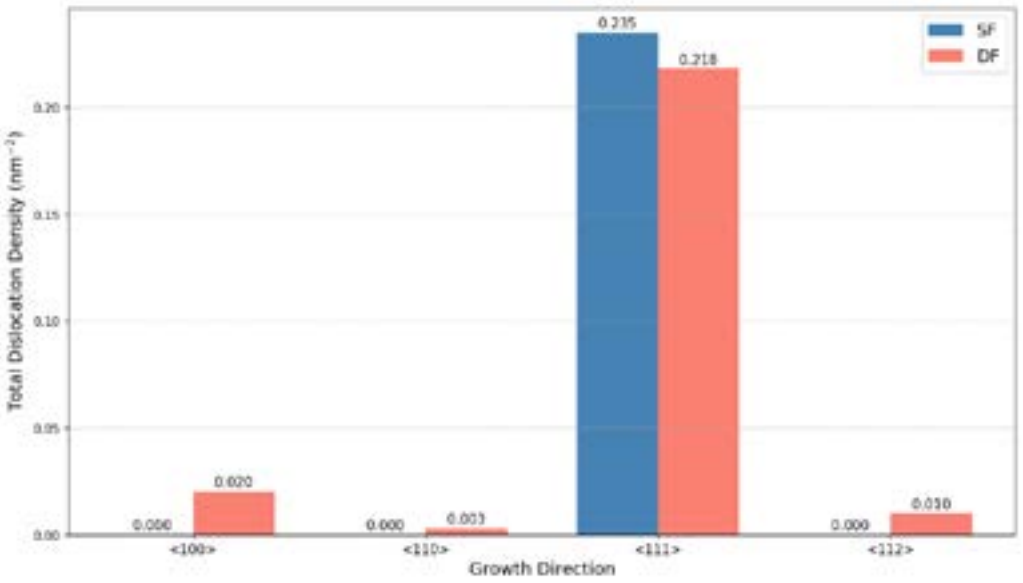


Figure 5: Total dislocation density by growth orientation for SF and DF after 8 ns of cooling.

4. DISCUSSION

The results demonstrate a clear dependence between crystallographic orientation, solidification front configuration, and dislocation nucleation. The ⟨111⟩ orientation systematically showed the highest dislocation density, consistent with reports by [7], who attribute this behavior to the optimal alignment between the growth direction and the {111} slip planes, facilitating the activation of slip systems. Conversely, the ⟨100⟩ and ⟨110⟩ orientations showed lower propensity for defect formation, consistent with their larger angle relative to the {111} planes, which structurally discourages dislocation nucleation [11].

The dual-front configuration generated an increase in dislocation density compared to the single-front configuration, particularly in the ⟨100⟩ and ⟨111⟩ orientations. This phenomenon is explained by the collision of solidification fronts, which generates high local stresses and structural incompatibilities in the confluence zone, acting as preferential sites for defect nucleation [12], [13]. In these configurations, the formation of dislocation loops was predominantly observed in the collision region, with the ⟨100⟩ and ⟨112⟩ orientations showing the most extensive loops.

Solidification time also influenced the final dislocation density. Contrary to intuitive expectation, prolonged cooling (8 ns) did not always result in lower defect density. In the ⟨111⟩ orientation, the additional time allowed for the nucleation and interaction of new dislocations, increasing the overall density. This behavior suggests that, in certain orientations, longer relaxation time may facilitate the reorganization of defects into metastable configurations rather than their annihilation [2].

Although the dislocation densities obtained in this work (in the range of 10^{-3} to 10^{-1} nm^{-2}) are orders of magnitude higher than those experimentally reported in silicon ingots (10^{-8} to 10^{-6} nm^{-2}), this discrepancy is primarily attributable to scale differences. The simulations encompass nanometric dimensions where nucleation phenomena are statistically more relevant, while experimental values are typically obtained from bulk ingots, representing averaged defect densities over volumes spanning from ~100 μm [3], [14].

5. CONCLUSION

Crystallographic orientation significantly determines dislocation nucleation during silicon solidification. The ⟨111⟩ direction showed the highest dislocation density, while the ⟨100⟩ and ⟨110⟩ orientations exhibited notable resistance to defect formation. The dual-front configuration promoted the formation of dislocation loops in the solidification front collision zone, particularly in the ⟨100⟩ and ⟨112⟩ orientations. The nanoscale results provide fundamental information about dislocation nucleation mechanisms, relevant for the design of crystal growth processes with defect control.

APPENDIX

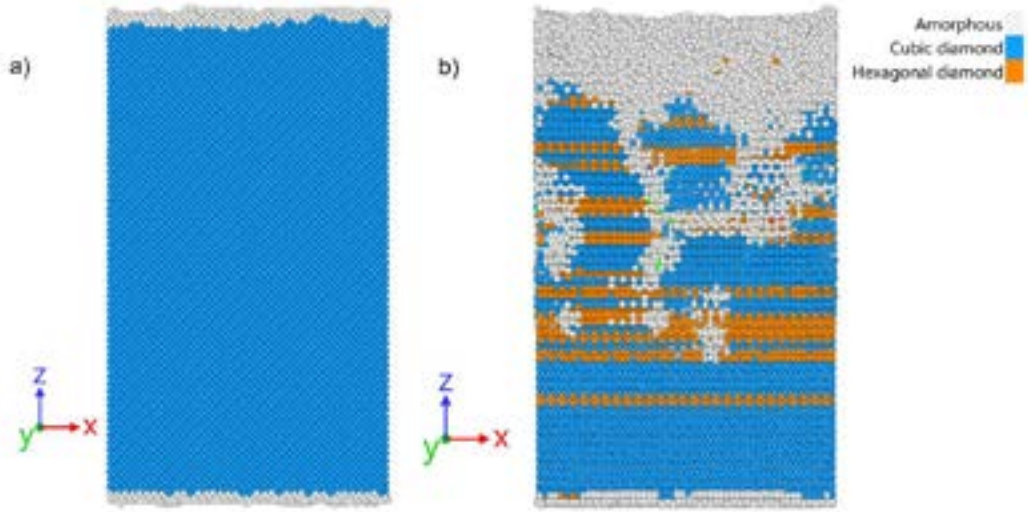


Figure 6: SF configuration after 6 ns a) ⟨100⟩ b) ⟨111⟩

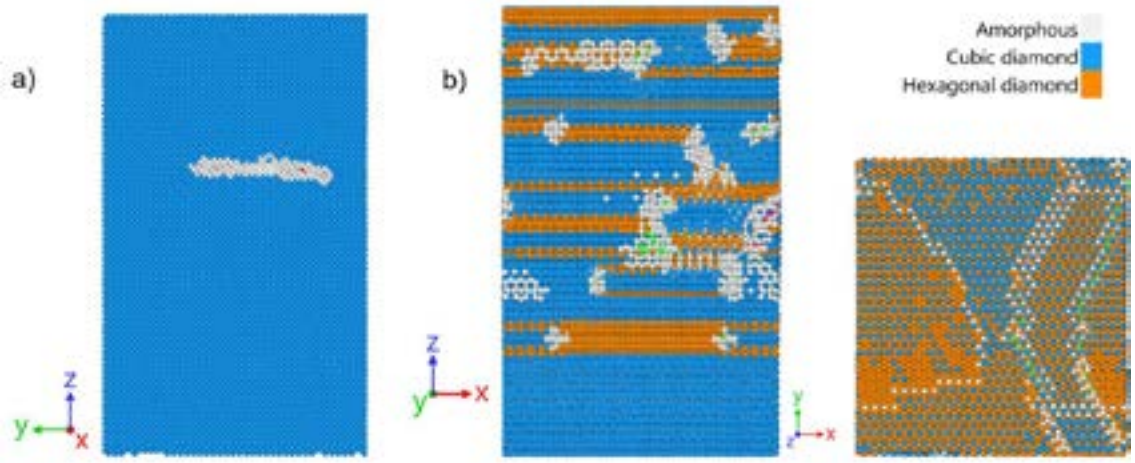


Figure 7: DF configuration after 6 ns a) ⟨100⟩ b) ⟨111⟩

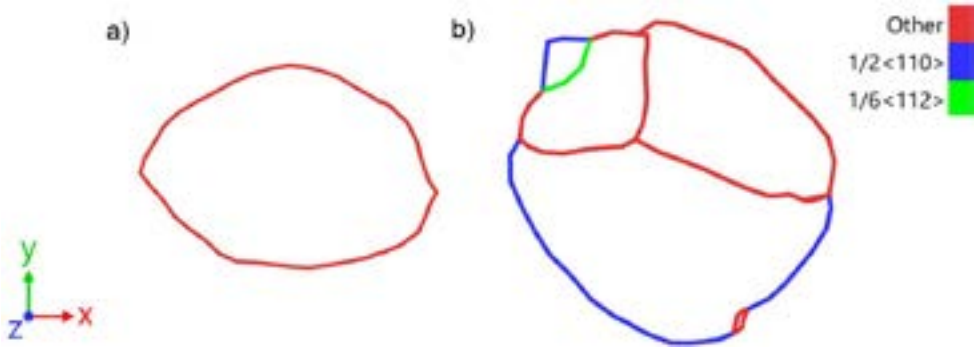


Figure 9: Dislocation loops in ⟨100⟩ orientation - DF configuration: a) 6 ns; b) 8 ns.

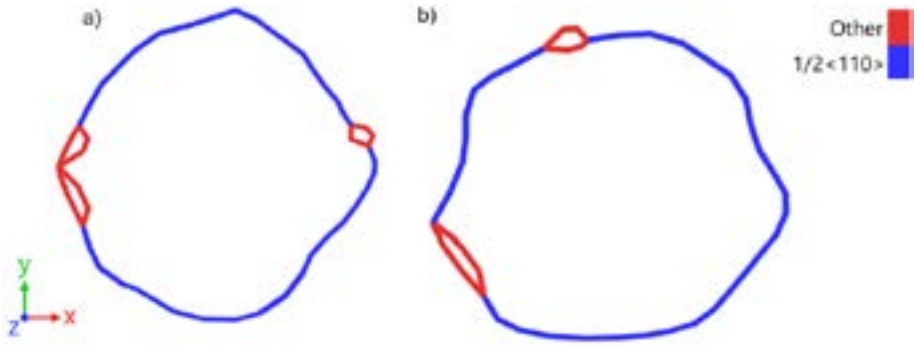


Figure 10: Dislocation loops in ⟨112⟩ orientation - DF configuration: a) 6 ns; b) 8 ns.

ACKNOWLEDGMENT

Thanks to Facultad Politécnica – Universidad Nacional Asunción (FPUNA) – Fondos de Investigación del Rectorado (FIR) for their financial support.

REFERENCES

[1] Ballif, C., Haug, F. J., Boccard, M., Verlinden, P. J., & Hahn, G. (2022). Status and perspectives of crystalline silicon photovoltaics in research and industry. In *Nature Reviews Materials* (Vol. 7, Issue 8, pp. 597–616). Nature Research.

[2] Woo, S., Bertoni, M., Choi, K., Nam, S., Castellanos, S., Powell, D. M., Buonassisi, T., & Choi, H. (2016). An insight into dislocation density reduction in multicrystalline silicon. In *Solar Energy Materials and Solar Cells* (Vol. 155, pp. 88–100). Elsevier B.V.

[3] Ryningen, B., Stokkan, G., Kivambe, M., Ervik, T., & Lohne, O. (2011). Growth of dislocation clusters during directional solidification of multicrystalline silicon ingots. *Acta Materialia*, *59*(20), 7703–7710.

[4] Su, W., Han, X., Chang, C., Zhang, Z., Zhang, Z., Yang, W., Li, J., & Wang, J. (2021). Impact of seed orientation on dislocation propagation in cast seed-assisted monocrystalline silicon. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, *230*.

[5] Takeuchi, N., & Romero, A. H. (2019). Simulaciones computacionales de materiales y nanoestructuras. FONDO DE CULTURA ECONOMIC.

[6] Freitas, R., & Reed, E. J. (2020). Uncovering the effects of interface-induced ordering of liquid on crystal growth using machine learning. *Nature Communications*, *11*(1).

[7] Zhou, N., Wu, X., Wei, X., Zhou, L., Wan, Y., & Hu, D. (2016). A molecular dynamics study of nucleation of dislocation in growth of silicon from melt. *Journal of Crystal Growth*, *443*, 15–19.

[8] Kumagai, T., Izumi, S., Hara, S., & Sakai, S. (2007). Development of bond-order potentials that can reproduce the elastic constants and melting point of silicon for classical molecular dynamics simulation. *Computational Materials Science*, *39*(2), 457–464.

[9] Hoover, W. G. (1985). Canonical dynamics: Equilibrium phase-space distributions. Physical Review A, 31(3), 1695.

[10] Stukowski, A., Bulatov, V. V., & Arsenlis, A. (2012). Automated identification and indexing of dislocations in crystal interfaces. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, *20*(8).

[11] Wang, L., Liu, J., Li, Y., Wei, G., Li, Q., Fan, Z., Liu, H., An, Y., Liu, C., Li, J., Fu, Y., Liu, Q., & He, D. (2024). Dislocations in Crystalline Silicon Solar Cells. In *Advanced Energy and Sustainability Research* (Vol. 5, Issue 2). John Wiley and Sons Inc.

[12] Klapper, H., & Rudolph, P. (2015). Defect Generation and Interaction during Crystal Growth. In *Handbook of Crystal Growth: Bulk Crystal Growth: Second Edition* (Vol. 2, pp. 1093–1141). Elsevier Inc.

[13] Rudolph, P. (2017). Dislocation patterning and bunching in crystals and epitaxial layers - a review. In *Crystal Research and Technology* (Vol. 52, Issue 1). Wiley-VCH Verlag.

[14] Ekstrøm, K. E., Stokkan, G., Søndenå, R., Dalaker, H., Lehmann, T., Arnberg, L., & Di Sabatino, M. (2015). Structure and dislocation development in mono-like silicon. *Physica Status Solidi (A) Applications and Materials Science*, *212*(10), 2278–2288.

[15] Thompson, A. P., Aktulga, H. M., Berger, R., Bolintineanu, D. S., Brown, W. M., Crozier, P. S., in 't Veld, P. J., Kohlmeyer, A., Moore, S. G., Nguyen, T. D., Shan, R., Stevens, M. J., Tranchida, J., Trott, C., & Plimpton, S. J. (2022). LAMMPS - a flexible simulation tool for particle-based materials modeling at the atomic, meso, and continuum scales. *Comp. Phys. Comm.*, *271*, 108171.

[16] Tersoff, J. (1988). New empirical approach for the structure and energy of covalent systems. Physical Review B, 37(12), 6991.

44º SENAFOR

28ª Conferência Internacional de Forjamento - Brasil
14ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas / 11º Congresso do BrDDRG
14ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis
3ª Conferência Internacional de Inovação em Materiais e Manufatura
Porto Alegre, RS, dias 1, 2 e 3 de outubro de 2025
www.senafor.com

Análise de Desempenho Tribológico de Lubrificantes em um Ensaio Esfera-Sobre-Placa em um Tribômetro de Movimento Recíproco

Tribological Performance Analysis of Lubricants in a Ball-on-Plate Test in a Reciprocating Tribometer

Diego Ellwanger [1]
Régis Henrique da Silva Souza [2]
Ney Francisco Ferreira [3]
Alice do Amaral Rodrigues [4]
Germano Lasch [5]
Liu Yesukai de Barros [6]
Patric Daniel Neis [7]

RESUMO

No projeto de um sistema mecânico, a escolha do lubrificante a ser empregado para uma dada aplicação é um ponto de grande relevância para os tribologistas, visto ele ser responsável por diminuir o atrito entre os componentes e prolongar a vida útil do sistema. O objetivo deste trabalho é analisar a performance tribológica de três óleos comerciais, para diferentes aplicações, avaliando os resultados de atrito e desgaste. Foi utilizado um tribômetro de movimento recíproco, do tipo esfera-sobre-placa, com a região de contato imersa em óleo a fim de promover o contato do par tribológico (esfera de aço SAE 52100 e placa plana de SAE 1020). Além disso, foi feita análise microscópica e interferométrica das trilhas desgastadas sobre a placa plana, a fim de quantificar o desgaste em cada caso. Após a análise dos resultados, concluiu-se que o óleo de menor viscosidade (AW32) apresentou o maior atrito, enquanto o de viscosidade intermediária (SAE90) demonstrou o menor atrito e desgaste. A

hipótese levantada é de que, além da viscosidade, os aditivos presentes no SAE90 foram fundamentais para a redução do atrito e desgaste, especialmente em regiões de velocidades próximas, ou iguais, a zero.

Palavras chave: Tribologia; Lubrificação; Reciprocating; Esfera-sobre-Placa.

ABSTRACT

When designing a mechanical system, choosing the right lubricant for a given application is a highly relevant consideration for tribologists, as it reduces friction between components and extends the system's service life. The objective of this study is to analyze the tribological performance of three commercial oils for different applications, evaluating friction and wear. A reciprocating ball-on-plate tribometer was used, with the contact area immersed in oil, promoting contact between the tribological pair (SAE 52100 steel ball and SAE 1020 flat plate). Microscopic and interferometric analyses of the worn tracks on the flat plate were also performed to quantify wear in each case. After analyzing the results, it was concluded that the oil with the lowest viscosity (AW32) exhibited the highest friction, while the oil with intermediate viscosity (SAE90) demonstrated the lowest friction and wear. The hypothesis raised is that, in addition to viscosity, the additives present in SAE90 were fundamental for reducing friction and wear, especially in regions of speeds close to, or equal to, zero.

Keywords: Tribology; Lubrication; Reciprocating; Ball-on-plate.

1. INTRODUÇÃO

Segundo [1], a tribologia tem enfoque no estudo do atrito, desgaste e lubrificação de superfícies em movimento relativo. O termo tribologia surgiu por volta de 1960-1970, com origem na palavra grega tribos, que significa “esfregar”. Apesar do termo ser recente, o interesse da sociedade sobre aspectos da tribologia existe desde a antiguidade, sempre buscando facilitar atividades do dia a dia e trazer economia em processos. Dentre essas buscas, a lubrificação é uma das mais estudadas.

Selecionar o melhor lubrificante para um sistema mecânico é essencial para melhorar a eficiência e a confiabilidade. A principal função de um lubrificante é diminuir o atrito e o desgaste do sistema, mas também pode colaborar em outros pontos, como dissipação de calor e proteção contra corrosão [1]-[2]. A escolha do lubrificante inadequado pode comprometer a formação do filme lubrificante, levando a falhas prematuras de componentes, aumentando o consumo de energia e os custos de manutenção. Além disso, fatores como viscosidade, aditivos, compatibilidade de materiais, polaridade e estabilidade térmica devem ser considerados para garantir que o lubrificante atenda às condições operacionais e de aplicação. Portanto, a seleção cuidadosa do lubrificante não apenas prolonga a vida útil do componente, mas também garante maior eficiência e confiabilidade do sistema.

Diversos métodos/procedimentos de avaliação das propriedades tribológicas dos materiais estão atualmente disponíveis para os tribologistas. Dentre esses métodos, o tribômetro recíproco (*reciprocating*) é considerado um tipo importante de ensaio tribológico. Como o próprio nome sugere, seu princípio de funcionamento baseia-se no movimento alternado, geralmente aplicado a um pino (ou esfera) sobre uma placa fixa, formando uma trilha de desgaste linear. [3] mostra a elaboração de um desses equipamentos. Os tribômetros recíprocos são comumente usados para avaliar o desempenho de lubrificantes, pois podem representar o movimento alternado de contato encontrado em aplicações reais, como engrenagens, contatos de anéis de pistão, etc.

Além do procedimento de ensaio e do *hardware* do tribômetro recíproco, o pós-processamento dos dados experimentais também são relevantes para a análise. Em relação disso, existem várias maneiras de determinar o coeficiente de atrito, que varia significativamente ao longo de cada ciclo de movimento do tribômetro. Um dos métodos

que se encontra em estudos é calcular o RMS (*root mean square*, ou Raiz Média Quadrática). Em [4] foi utilizado esse método para avaliar a força de atrito dinâmico em seus ensaios sobre um tribômetro recíproco. Embora tenha sido utilizado esse método (RMS) para analisar contato deslizante a seco, ele pode ser usado para deslizamento lubrificado também.

O presente estudo tem como objetivo avaliar o desempenho de três óleos lubrificantes convencionais, com aplicações distintas. Todos os ensaios foram realizados com os lubrificantes a 40 °C, padrão de estudos com lubrificantes. As trilhas de desgaste obtidas em cada ensaio foram analisadas com um microscópio Axio Lab.A1 e um interferômetro Countour GT-K Bruker, resultando também em valores de desgaste para cada trilha para análise conjunta com os valores de atrito.

2. MATERIAIS E METODOLOGIA

Os experimentos foram realizados em um tribômetro recíproco de esfera sobre placa do Laboratório de Tribologia (LATRIB-UFRGS), Brasil. O deslocamento da esfera foi de 4 mm (curso = 4mm), gerando trilhas de mesmo tamanho. A velocidade média da esfera é de 1 mm/s ao longo dos testes, mas a instantânea segue um comportamento senoidal. Cada ensaio tem duração de 11h 06min, gerando ao final uma distância percorrida pela esfera de 40 metros. Cada ensaio com um lubrificante foi executado por duas vezes.

Uma célula de carga (de 10 N de capacidade) mede a força de atrito da esfera sobre a placa. Um peso morto é utilizado para exercer a força vertical (F) da esfera sobre a placa, resultando em uma força normal de 10 N. Um tacômetro mede a rotação do eixo do motor do tribômetro e garante que ele esteja na rotação correta de 7,5 rpm (resultando em 1 mm/s de velocidade média linear). O contato entre a esfera e a placa é lubrificado por banho de óleo (a placa fica submersa) e o óleo aquecido por uma resistência elétrica colocada abaixo do recipiente onde a placa é fixada. A temperatura foi medida usando um termopar tipo K imerso no recipiente de óleo, com controle manual da temperatura através de um dimmer. O ponto de contato entre a esfera e a placa está esquematizado na Figura 1 e os parâmetros dos testes estão resumidos na Tabela 1.

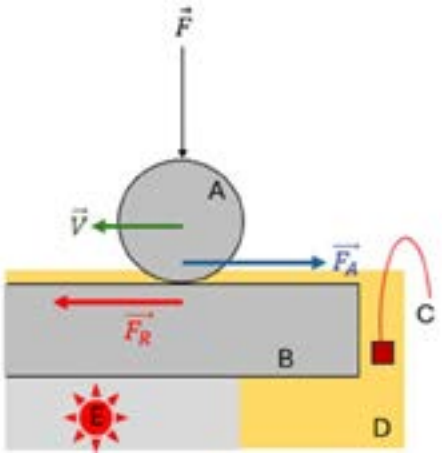


Figura 1: Ilustração do contato esfera sobre placa do tribômetro reciprocating utilizado, sendo: esfera (**A**), placa (**B**), termopar (**C**), lubrificante (**D**), resistência de aquecimento (**E**), força normal aplicada ($\vec{F}$), força de atrito ($\vec{F_A}$), força de reação ao atrito na placa ($\vec{F_R}$ que é medida pela célula de carga) e velocidade da esfera ($\vec{V}$).

Tabela 1: Parâmetros de Ensaio

Parâmetro	Valor
Força Aplicada	10 N
Veloc. Média	1 mm/s
Temp. Lubrificante	40°C
Tempo de Ensaio	11h 06min
Curso	4 mm

Os três óleos comerciais escolhidos foram nomeados conforme as suas especificações: AW32, SAE90 e ISO220. O primeiro é um óleo hidráulico, o segundo é aplicado em correntes de transmissão de motocicletas e o terceiro é usado em correntes de motosserras. Apesar de suas nomenclaturas especificarem classificações de viscosidade, as viscosidades dos óleos foram medidas a 40°C em um reômetro ARES-G2, da marca TA Instruments, pertencente ao Centro de Combustíveis (CECOM) da UFRGS. As esferas foram feitas de aço SAE 52100 e as placas de aço SAE 1020. Antes dos ensaios, cada placa teve sua superfície lixada com lixas de granulometria 600, 1200 e 2000, e posteriormente utilizada uma politriz rotacional para polimento. Além disso, tanto a esfera quanto a placa foram limpas com éter antes de cada teste, para evitar contaminação externa. A tabela 2 traz as informações sobre os materiais utilizados, bem como as medições de viscosidade dos óleos. A figura 2 mostra os materiais de contato e exemplos das trilhas de desgaste na placa. Cada trilha de desgaste corresponde a um único ensaio.

Figura 2: Exemplo de esfera (à esquerda) e placa utilizada (à direita), onde as trilhas presentes na placa são resultado do desgaste dos ensaios.

Tabela 2: Informações dos materiais utilizados.

Material	Características	
Óleo AW32	Viscosidade Dinâmica: 32,47 mPa.s	
Óleo SAE90	Viscosidade Dinâmica: 147,55 mPa.s	
Óleo ISO220	Viscosidade Dinâmica: 180,96 mPa.s	
Esfera SAE52100	Dureza 772 HV	Diâmetro 10 mm
Placa SAE1020	Dureza 35 HV	20x10x4,5 mm (CxLxE)

A célula de carga do tribômetro reciprocating foi calibrada utilizando pesos com massa conhecida e a linearidade da célula de carga foi encontrada na faixa de 99% para o procedimento de calibração. Um sistema de aquisição de dados (Lynx) foi configurado para uma taxa de aquisição de 125 Hz para registrar os dados de força de atrito e temperatura. O coeficiente de atrito (μ) foi determinado no pós-processamento dos dados, dividindo a força de reação (atrito) medida (F_R) pela força aplicada (F), conforme

indicado em [5]. A equação 1 apresenta a equação matemática empregada para determinação do atrito.

$$\mu = \frac{F_R}{F} \tag{1}$$

Como o movimento alternado entre a esfera e a placa é sinodal, alternando-se o sentido, a força de atrito apresenta um comportamento particular, conforme mostrado na figura 3, conforme descrito em [6]. Ela normalmente apresenta os maiores valores próximos às bordas (ponto morto superior e inferior). Esse comportamento é resultado de mudanças na velocidade de deslizamento ao longo do ciclo, onde um atrito maior é geralmente conhecido como atrito estático (f_s) e um atrito menor, como atrito cinético (f_k) no trechos de maiores magnitudes do movimento relativo.

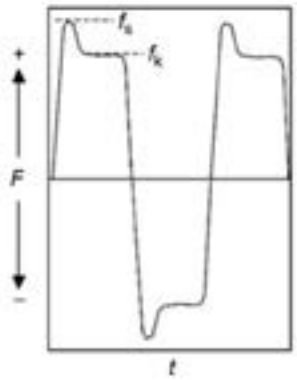


Figura 3: Exemplo de comportamento da força de atrito ao longo dos ensaios *reciprocatin.*[Fonte: 6]

No presente estudo, a raiz média quadrática (RMS) foi utilizada para obter um valor representativo apenas para o atrito, englobando estático e cinético, para fins de comparação entre os óleos. Com isso, após calculados os coeficientes de atrito pela equação 1, determinou-se o coeficiente de atrito RMS (equação 2). Estimou-se ainda o desvio padrão do resultado RMS, calculado entre todos os dados para uma dada repetição. Na equação 1, *N* é o número total de dados medidos em um ensaio completo e x_i o valor do atrito em cada ponto.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} {x_i}^2} \tag{2}$$

Os valores de temperatura também foram medidos e ao final calculada a média e desvio padrão.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na figura 4 está plotado o comportamento do coeficiente de atrito de um dado intervalo (escolhido aletoriamente) de 16 segundos do primeiro ensaio do óleo AW32.

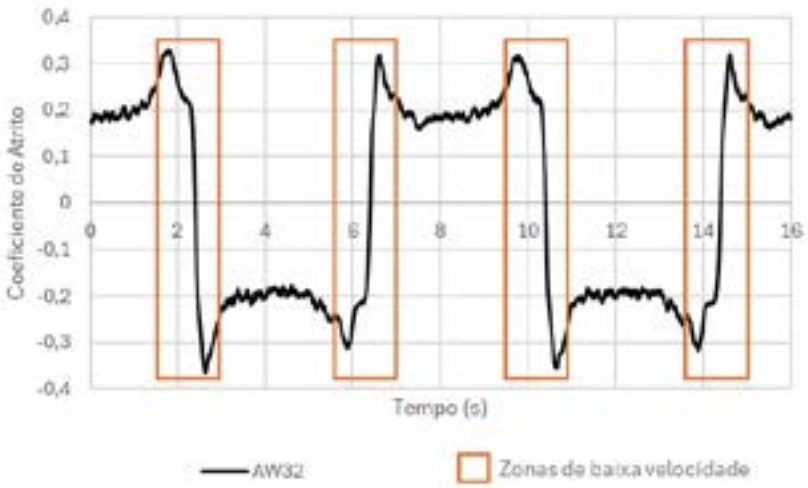


Figura 4: Comportamento do coeficiente de atrito para o primeiro ensaio do AW32.

Nota-se nesse gráfico um comportamento semelhante com o apresentado na figura 3, o que afirma que os ensaios seguiram um comportamento de certa forma esperado. Destaca-se em laranja as zonas de baixa velocidade (próxima aos extremos do movimento, onde a velocidade relativa é baixa), onde há um aumento dos valores de atrito. Os valores de temperatura, atrito e desgaste estão compilados na tabela 3. Para facilitar a análise, os dados foram plotados no gráfico da figura 5.

Tabela 3: Compilação dos resultados dos ensaios.

Óleo	Viscos. [mPa.s]	Temperat. Média (DESV. PAD.)	Coef. Atrito RMS (DESV. PAD.)	Volume Desgaste [x10^6 µm³]
AW32	32,47	42,72°C (1,08°C)	0,212 (0,048)	4,836
		42,45°C (0,62°C)	0,208 (0,040)	5,682
SAE90	147,55	43,04°C (0,38°C)	0,132 (0,017)	3,926
		42,18°C (0,55°C)	0,135 (0,017)	3,603
ISO220	180,96	39,93°C (1,11°C)	0,171 (0,030)	7,080
		37,33°C (0,19°C)	0,156 (0,021)	7,606

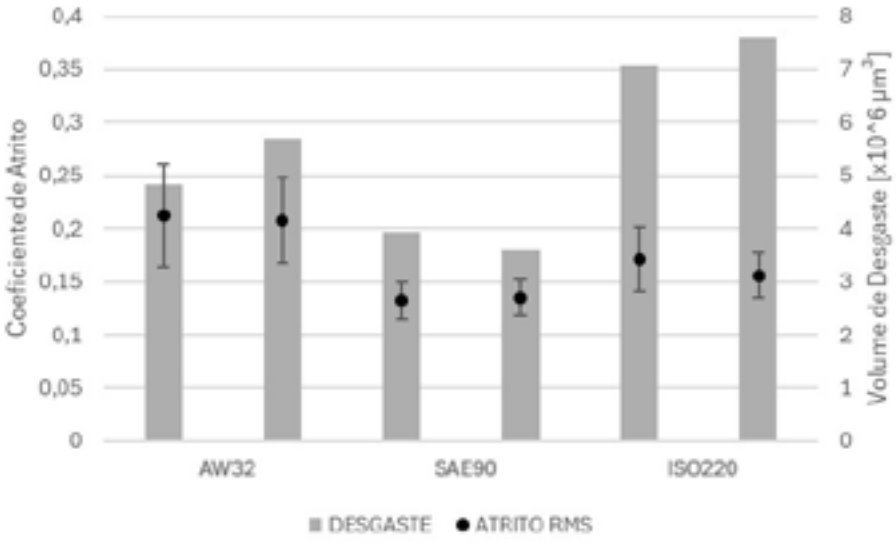


Figura 5: Gráfico de atrito RMS e volume de desgaste para cada trilha.

Pelo gráfico (figura 5) e a tabela 3, nota-se que a repetibilidade dos ensaios se mostrou relativamente satisfatória, com os três óleos tendo resultados aproximados nas duas execuções. O óleo AW32 mostrou os maiores valores de atrito, enquanto o SAE90 apresentou resultados de atrito sensivelmente menores aos demais lubrificantes. Referente aos volumes de desgaste, o óleo ISO220 exibiu os maiores volumes, enquanto o SAE90, novamente, obteve os menores valores.

A fim de se verificar a correlação entre viscosidade e atrito, bem como viscosidade e desgaste, empregou-se a função correl entre os dados através do Microsoft Excel. Para os valores de viscosidade e atrito, obteve-se uma correlação de cerca de -80%, portanto uma correlação de força média e negativa. Isso significa que, paras as formulações avaliadas, a maior a viscosidade levou ao menor atrito. Já correlacionando viscosidade com volume desgastado, verificou-se uma correlação de aproximadamente 30%. Assim, pode-se dizer que praticamente não há correlação entre viscosidade e desgaste para os lubrificantes testados. Por fim, entre atrito e volume desgastado, a correlação fica em cerca de 30% também. Novamente, não se pode concluir uma relação direta entre as variáveis correlacionadas.

Para complementar a análise dos resultados de atrito e desgaste, realizou-se a avaliação das microscopias e das interferometrias das trilhas desgastadas, as quais são mostradas na figura 6.

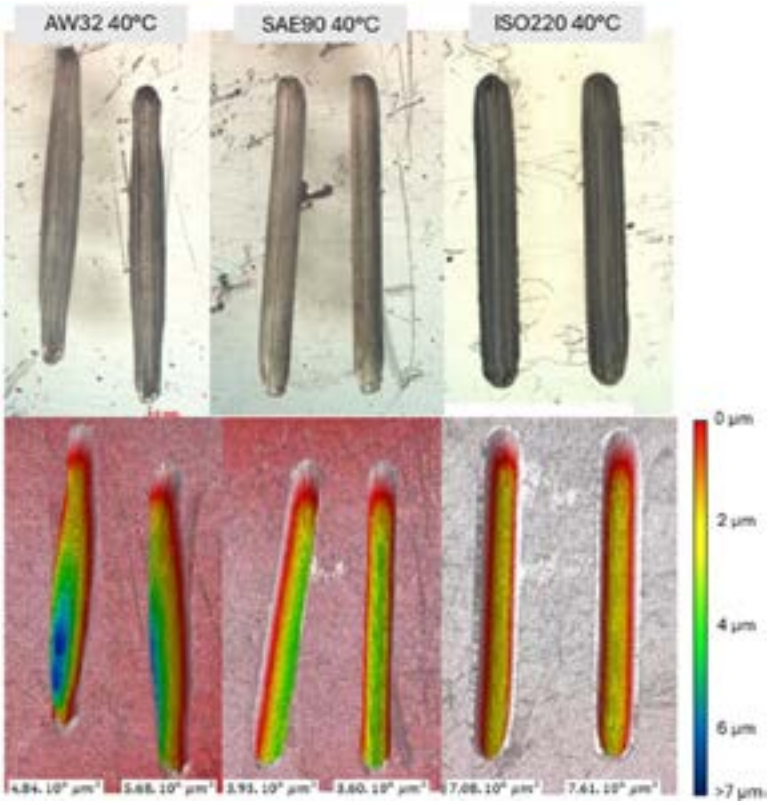


Figura 6: Microscopias e interferometrias para cada trilha.

Nota-se que o AW32 apresentou marcas com uma profundidade maior nas regiões mais aos centro da trilha, onde inclusive mostrou ter uma largura maior que nas suas extremidades. A hipótese levantada para esse óleo é que seus aditivos colaboraram para redução do atrito nas extremidades, onde a viscosidade não é tão influente devido às baixas velocidades relativas. Já nas regiões centrais, onde o efeito da viscosidade se torna importante, pelo fato deste óleo possuir baixa viscosidade, a hipótese é que essa viscosidade reduzida não foi suficiente para desenvolver suficientemente um filme de óleo nesta região mais ao centro.

O ISO220 não apresentou diferenças significativas entre o desgaste das extremidades com o desgaste das regiões centrais das trilhas, mostrando uma trilha de desgaste mais “uniforme”. Também não apresentou marcas tão profundas como o AW32, mas desenvolveu trilhas com largura maior, o que resultou num maior volume de desgaste (o maior dentre os lubrificantes). A hipótese levantada é que, por ter apresentado um aspecto mais escurecido das trilhas dentre os três óleos, a presença de óxidos sobre a superfície é maior, logo, o desgaste triboquímico foi mais severo, o que colaborou para o aumento do desgaste.

O óleo SAE90 foi o que apresentou os melhores resultados de atrito e desgaste (figura 5). A profundidade de desgaste verificada foi intermediária dentre os óleos, mas apresentou as trilhas com menores larguras. O desgaste também se apresentou de forma uniforme, semelhante ao ISO220, sem diferenças significativas de desgaste entre as regiões centrais e as extremidades. Para o óleo SAE90, a hipótese levantada é que esse óleo também possui aditivos que influenciaram na redução do desgaste nas extremidades. Entretanto, por ter uma maior viscosidade que o AW32, ele também tem uma facilidade maior de formar filme lubrificante nas regiões de maior velocidade, colaborando para a redução do desgaste das trilhas.

Sobre os mecanismos de desgaste, em geral, marcas verticais podem ser vistas sobre as trilhas, levando à conclusão de que houve predominância de desgaste abrasivo. Entretanto, nas extremidades de todas trilhas há pequenas regiões com uma morfologia mais aleatória, com forma diferente de um semi-círculo. Isso indica a presença de desgaste adesivo. Por fim, todas trilhas possuem um escurecimento característico frente ao restante da placa, indicando presença de óxidos sobre a trilha, evidência de desgaste triboquímico. Este efeito possui maior ênfase na trilha resultante do óleo ISO220, onde a marca é mais escura.

4. CONCLUSÕES

Com base nos resultados apresentados e nas discussões feitas, pode-se concluir que:

- Dentre os lubrificantes estudados, a ordem de volume de desgaste, da maior magnitude para a menor, foi: ISO220, AW32 e SAE90. O óleo ISO220, apesar do desgaste uniforme, sofreu com o maior desgaste triboquímico. O AW32, de baixa viscosidade, falhou em proteger a região mais ao centro da trilha. A baixa viscosidade deste óleo pode ter impedido a formação de filme nas regiões de mais alta velocidade relativa (mais ao centro). Por fim, o SAE90 foi mais eficaz, equilibrando a ação de seus aditivos nas extremidades com sua alta viscosidade para formar um filme lubrificante adequado no centro, resultando no melhor desempenho tribológico.
- A metodologia aplicada com a utilização de RMS e desvio padrão para obtenção dos valores de atrito, aliados à utilização de microscópio e interferômetro para avaliação da superfície e do desgaste, se mostrou satisfatória;
- A viscosidade dos óleos apresentou uma correlação intermediária e inversamente proporcional aos valores de atrito, sendo que AW32, que tem a menor viscosidade, apresentou os maiores valores de atrito RMS, podendo ser devido a menor capacidade de formação de filme lubrificante nas regiões centrais da trilha (maior velocidade). A viscosidade não apresentou correlação significativa com os valores de desgaste. Também não foi observada correlação significativa entre atrito e desgaste;
- Os aditivos presentes nos óleos são importantes para seu bom desempenho tribológico, especialmente em regiões de baixa velocidade;

- Desgaste abrasivo foi predominante, havendo indícios de desgaste adesivo nas extremidades. Além disso, a presença do desgaste triboquímico foi mais forte no ISO220.

Com isso, pôde-se evidenciar que a escolha do lubrificante mais adequado para o sistema mecânico no qual será empregado não pode ser baseado somente no valor da viscosidade, devendo também se levar em conta também questões sobre os aditivos empregados no lubrificante.

5. REFERÊNCIAS

[1] STACHOWIAK, G. W.; BATCHELOR, A. W. Engineering tribology. Amsterdam: Butterworth-Heinemann, 2005.

[2] MANG, T.; DRESEL, W. (ed.). Lubricants and lubrication. 2. ed. Weinheim: Wiley-VCH, 2007.

[3] MOHAN, C. B. et al. Design and development of an advanced linear reciprocating tribometer. Wear, v. 267, n. 5-8, p. 1111–1116, 1 jun. 2009.

[4] BONNY, K. et al. Dry Reciprocating Sliding Friction and Wear Response of WC–Ni Cemented Carbides. Tribology Letters, v. 31, n. 3, p. 199–209, 23 ago. 2008.

[5] MENEZES, P. L. et al. Tribology for Scientists and Engineers : From Basics to Advanced Concepts. New York, Ny: Springer New York, 2013.

[6] BLAU, P. J. Friction Science and Technology. [s.l.] CRC Press, 2009.

44º SENAFOR

28ª Conferência Internacional de Forjamento - Brasil
14ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas / 11º Congresso do BrDDRG
14ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis
3ª Conferência Internacional de Inovação em Materiais e Manufatura
Porto Alegre, RS, dias 1, 2 e 3 de outubro de 2025
www.senafor.com

AVALIAÇÃO DO DESGASTE DO EIXO DO MANCAL DA FERRAMENTA PARA UMA ESQUADRADORA DE PORCELANATO: UM ESTUDO DE CASO

Julio Ricardo de Aguiar [1]
Richard de Medeiros Castro [2]
Jamile Thon Langbehn [3]
Clauber Roberto Melo Marques [4]
Luiz Carlos de Cesaro Cavaler [5]

ABSTRACT

A crescente exigência por qualidade e precisão na indústria cerâmica, especialmente nos processos de retificação de porcelanatos, evidencia a necessidade de soluções mais duráveis para componentes sujeitos a desgaste severo, como o eixo do mancal da ferramenta das esquadradoras. Este estudo avaliou o comportamento tribológico do eixo principal da esquadradora Squadra 12/1 BMR, com o objetivo de reduzir o desgaste abrasivo por meio da aplicação de revestimentos, buscando alternativa viável que aumente a vida útil do equipamento. Atualmente, o material utilizado é o aço SAE 4140, sem cobertura, cujo coeficiente de desgaste, conforme a norma ASTM G65, resultou em $1{,}48\times10^{-3}$. Foram avaliados dois tipos de revestimentos aplicados aos corpos de prova: cromo duro, por eletrodeposição, e carboneto de tungstênio WC-10Co-4Cr, por aspersão térmica HVOF. Este último apresentou melhor desempenho, com coeficiente de desgaste de $1{,}12\times10^{-4}$. A metodologia envolveu preparação dos corpos de prova, ensaios de microdureza, análise microestrutural e testes de desgaste. Concluiu-se que a deposição de WC-10Co-4Cr na superfície do eixo principal é tecnicamente viável e vantajosa, promovendo significativa redução do desgaste e ampliando a vida útil do componente em média quarenta vezes. Como perspectivas futuras, recomenda-se testar os revestimentos sob diferentes condições de temperatura, carga e ambiente corrosivo, além de realizar análise de custo-benefício considerando todo o ciclo de vida dos materiais.

Palavras-chave: Esquadradora, Mancal da ferramenta, Desgaste abrasivo, WC 10Co-4Cr, Cromo duro.

1. INTRODUCAO

A indústria cerâmica vem se destacando mundialmente pelo uso de porcelanatos retificados, que exigem elevada precisão dimensional e acabamento de superfície. Esses resultados são obtidos em processos de retificação realizados por esquadradoras, nas quais os mancais da ferramenta assumem papel crucial ao garantir estabilidade, alinhamento e padronização durante o corte. Entretanto, esses mancais estão sujeitos a condições de atrito severas, resultando em desgaste progressivo que compromete a qualidade do produto final, reduz a confiabilidade do equipamento e eleva os custos de manutenção e substituição de componentes [1-3].

Pesquisas anteriores demonstram que os mecanismos predominantes nesses sistemas são o desgaste abrasivo e o adesivo, sendo a abrasão por partículas sólidas um dos modos mais críticos devido à ocorrência de abrasão de três corpos [4,5]. Ensaios padronizados, como o método da roda de borracha e areia, têm sido aplicados para quantificar perdas de volume e coeficientes de desgaste em diferentes ligas e revestimentos, fornecendo parâmetros de comparação confiáveis [6]. Além disso, trabalhos recentes apontam que variáveis como dureza superficial, microestrutura e granulometria do abrasivo têm influência direta na severidade do desgaste, indicando que soluções baseadas apenas em tratamentos térmicos superficiais podem ser insuficientes para atender às condições industriais de longo prazo [7].

Entre as alternativas de maior aplicação prática destacam-se os revestimentos metálicos duros. O cromo duro eletrodepositado é amplamente utilizado por sua relativa facilidade de aplicação e baixo custo, mas apresenta microtrincas residuais e limitações frente a cargas abrasivas intensas [8]. Por outro lado, os revestimentos de carboneto de tungstênio (WC-Co-Cr), aplicados por aspersão térmica HVOF, têm mostrado desempenho superior, com maior dureza, menor taxa de desgaste, melhor resistência à corrosão e elevada aderência à superfície [9]. Resultados publicados anteriormente reforçam que o desenvolvimento de revestimentos compósitos baseados em WC pode substituir o cromo duro em aplicações industriais de alto desgaste, reduzindo falhas prematuras e ampliando a vida útil de eixos e mancais [10].

Diante disso, este trabalho tem como objetivo comparar o desempenho tribológico do eixo do mancal de esquadradoras de porcelanato revestido com cromo duro por eletrodeposição e WC-10Co-4Cr por aspersão térmica HVOF. Serão conduzidos ensaios de desgaste abrasivo (ASTM G65), medições de microdureza e análises microestruturais para quantificar diferenças entre os revestimentos. Além disso, busca-se avaliar efeitos práticos, como redução de manutenção, maior confiabilidade e aumento da vida útil do equipamento. Do ponto de vista científico, os resultados apoiam a escolha de revestimentos para condições tribológicas severas, ampliando o uso de ligas de carbonetos em aplicações industriais exigentes.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo será possível a reprodução detalhadamente dos recursos utilizados e os procedimentos adotados para a realização dos experimentos desta pesquisa.

2.1 MATERIAIS

2.1.1 Mancal da Ferramenta

Como objeto de estudo, foi selecionado o eixo da ferramenta da esquadrejadora modelo Squadra Dry 12/1, fabricada pela empresa italiana BMR Spa (Fig. 1).

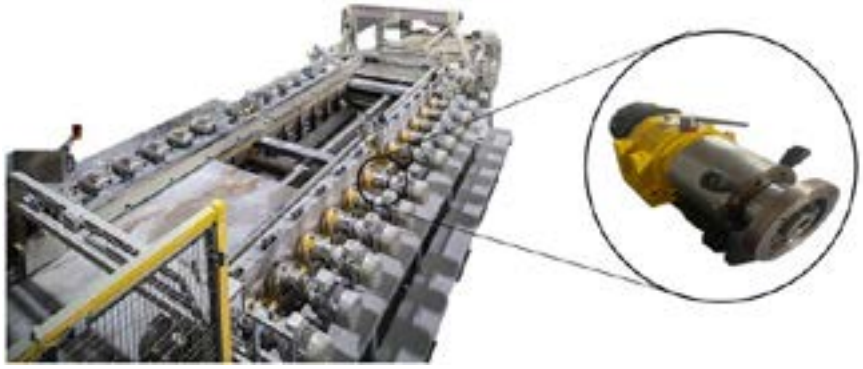


Figure 1: Esquadrejadora Squadra Dry 12/1 com destaque para o mancal da ferramenta.

A escolha da esquadrejadora Squadra 12/1 BMR foi estratégica por sua alta precisão, estabilidade e capacidade de operar continuamente em longos ciclos, características essenciais para analisar o desgaste abrasivo e o desempenho do mancal. Sua ampla utilização nas indústrias cerâmicas da região, pela confiabilidade e qualidade no acabamento, reforça a relevância prática do estudo [11].

2.2. METODOS

Nesta seção, descrevem-se minuciosamente os métodos e procedimentos empregados, assim como os recursos técnicos aplicados, que se revelaram fundamentais para a execução e desenvolvimento do presente estudo, garantindo a validade científica e a precisão dos dados obtidos.

2.2.1 Análise do tipo de desgaste do eixo principal

A análise do eixo principal (Fig. 2) foi realizada em microscópio digital modelo Wireless.

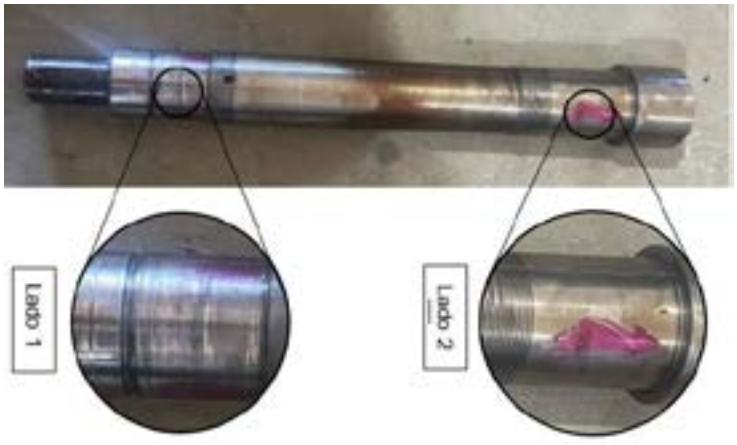


Figura 2: Eixo principal com destaque para as regiões de desgaste.

Na Fig. 2, observa-se o eixo principal para duas regiões evidentes de desgaste, ambas localizadas nas áreas de assentamento dos elementos de apoio. O lado 1, com diâmetro nominal de 40,02 mm, e o lado 2, com diâmetro nominal de 45,02 mm, ambos apresentam marcas compatíveis com o desgaste por atrito. Na Fig. 3 apresenta-se uma

imagem ampliada da região de desgaste, evidenciando marcas características de desgaste abrasivo severo.

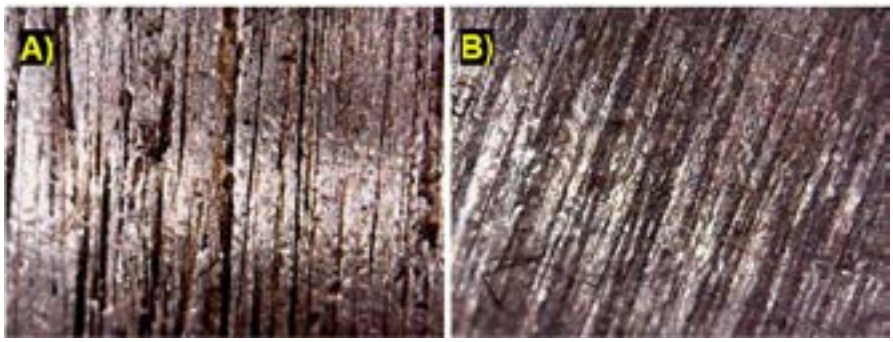


Figura 3: Imagem da região do desgaste. A) Lado 1 e B) do eixo principal

Por meio desta caracterização evidenciada pelo desgaste abrasivo como principal mecanismo de deterioração, observa-se os riscos paralelos e sulcos profundos nas micrografias, resultantes de microcorte e microfissuração superficial caracterizado pela penetração das partículas na matriz metálica, causados pela ação de partículas duras em contato com a superfície [12].

2.2.2 Preparação dos Corpos de Prova

Nos ensaios laboratoriais conforme ASTM-G65, foram produzidos três corpos de prova por revestimento. As superfícies passaram por limpeza com jateamento de granalha, seguida de banho ultrassônico em álcool isopropílico por seis minutos e posterior secagem com soprador de ar.

Tabela 1: Identificação dos corpos de prova.

Denominação	Quant.	Material/liga
CP 1	3	Aço SAE 4140
CP 2	3	Cromo Duro (Cr)
CP 3	3	WC-10Co-4Cr

2.2.3 Seleção e deposição dos revestimentos

O cromo duro catalisado foi obtido por processo eletrolítico de corrente contínua em solução de ácido crômico, composta por anidrido crômico dissolvido em água, acrescida de catalisador e ácido sulfúrico, com uma camada média de 0,05 a 0,3 mm. Já o revestimento HVOF foi aplicado após jateamento dos corpos de prova com óxido de alumínio de 24 mesh, obtendo rugosidade média de Ra 6,4 µm para melhor ancoragem mecânica. A deposição foi realizada utilizando o equipamento HP/HVOF JP-5000 da Praxair Surface, conforme dados da Tabela 2.

Tabela 2: Parâmetros usados no processo de aspersão térmica - HVOF.

Nº	Parâmetros	Valores	Unidade
01	Fluxo de Oxigênio	0,064 ± 0.004	m^3/min
02	Vazão mássica do pó	90	g/min
03	Velocidade da tocha para a deposição	300	mm/s
04	Distância da tocha ao corpo de prova	305	mm
05	Fluxo de querosene	7.57 ± 0.63	L/min

A taxa de desgaste dos materiais foi avaliada por ensaio de abrasão segundo o método da roda de borracha e areia (Procedimento A), conforme ASTM G65-16. Os resultados foram expressos em perda de volume calculada a partir da massa removida e da densidade de cada material. Esse ensaio reproduz uma condição de abrasão de baixa tensão, onde o fluxo contínuo de areia abrasiva causa desgaste por atrito em configuração de três corpos.

Para a quantificação do desgaste, utilizou-se areia de sílica AFS 50/70, com granulometria controlada, conforme recomenda a ASTM G65-00. Os parâmetros específicos dos ensaios realizados estão descritos na Tabela 3.

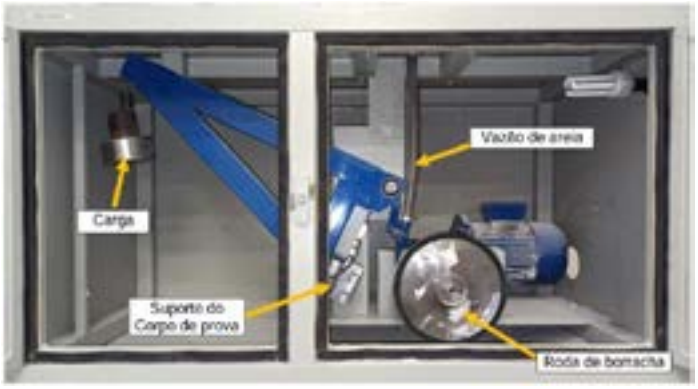


Figura 4: Detalhe do ensaio de desgaste ASTM G65.

Tabela 3: Parâmetros utilizados nos ensaios de desgaste ASTM G-65

Nº	Parâmetros	Valores	Unidade
1	Vazão da areia	355	g/min
2	Carga aplicada	130	N
3	Tempo total do ensaio	1800	s
4	Granulometria da areia	212 a 300	µm
5	Rotação da roda	200	rpm
6	Diâmetro da roda	228,4	mm

Os ensaios de abrasão a três corpos foram conduzidos com fluxo de areia por 30 minutos, com paradas a cada 6 minutos para determinação da constante de desgaste *k*. A quantificação foi feita em balança de precisão, e o volume de material removido (*Vr*) foi calculado a partir da massa perdida e da massa específica da superfície, conforme a Eq. 1.

$$Vr\ [mm^3] = \left(\frac{massa\ perdida\ [g]}{massa\ especifica\ [g/cm^3]}\right) * 1000 \quad (1)$$

A equação de Archard [13], apresentada na Eq. 2, é amplamente utilizada para estimar a taxa de desgaste específico em condições de desgaste abrasivo. Esta equação estabelece uma relação entre o volume de material perdido, a carga normal aplicada e a distância de deslizamento.

$$Vr = K * \frac{F_n * x}{H} \quad (2)$$

F_n = Força normal aplicada ao material [N]
x = Distância percorrida durante o ensaio [mm]
H = Dureza da superfície [N/mm²]
Vr = Volume de material desgastado [mm³]

2.2.4 Análise de microdureza e microestrutura

Os ensaios de dureza Vickers foram realizados em microdurômetro Shimadzu HMV TADW, conforme ISO 14577-1. Para o substrato aplicou-se carga de 9,807 N (HV1), enquanto para os revestimentos de cromo duro e WC-10Co4Cr utilizou-se carga de 980,7 mN (HV0,1), mantendo-se 10 segundos de aplicação em ambos os casos. A microestrutura das amostras foi analisada por microscopia óptica (Olympus BX51M), após preparação por embutimento, lixamento e polimento, permitindo observar substrato e revestimento sem necessidade de ataque químico.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 ANALISE DE MICRODUREZA E MICROESTRUTURA

Os resultados de microdureza mostraram diferenças significativas entre os materiais: o substrato apresentou dureza média de 282 HV1, enquanto o corpo de prova com revestimento de cromo duro atingiu 905 HV0,1. Já o revestimento de WC-10Co-4Cr alcançou 1408,5 HV0,1, confirmando sua elevada resistência ao desgaste, reconhecida por sua superioridade em relação ao cromo duro.

A microestrutura observada na seção transversal das amostras revelou as diferenças entre os revestimentos de Cr e WC-10Co-4Cr, permitindo comparar as regiões submetidas ao desgaste abrasivo pelo ensaio da roda de borracha com aquelas não afetadas mecanicamente.

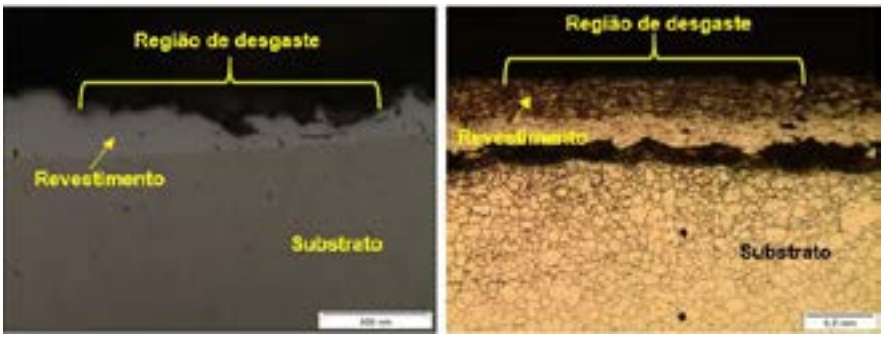


Figura 5: Microscopia das seções transversais dos revestimentos na região de rolagem da roda de borracha do abrasômetro. a) Cromo duro (Cr) e b) WC-10Co-4Cr.

As micrografias ópticas mostraram a seção transversal dos corpos de prova revestidos, destacando a interface entre o substrato SAE 4140 e as camadas aplicadas por banho de cromo e HVOF. Observou-se boa aderência entre as camadas, sem trincas ou falhas de delaminação, resultado de preparo superficial adequado e parâmetros corretos de deposição. A interface apresentou morfologia irregular, típica da aspersão térmica, favorecendo o ancoramento mecânico.

As análises de alta resolução revelaram que o revestimento de cromo duro possuía morfologia densa e espessura uniforme, mas com microdefeitos como trincas finas e porosidades decorrentes de tensões residuais. Apesar disso, a linha de separação entre revestimento e substrato manteve-se bem definida, indicando boa adesão inicial. A Fig. 5 mostrou que o desgaste não removeu totalmente a camada, garantindo proteção funcional do substrato e comprovando a eficácia dos revestimentos aplicados.

3.2 ANALISE DO DESGASTE

Os resultados de densidade mostraram que o aço SAE 4140 apresentou valor médio de 7,92 g/cm³, em conformidade com a literatura [14]. enquanto o corpo de prova revestido por HVOF atingiu 12,89 g/cm³, devido à presença do WC-10Co-4Cr, mais denso por conter carbonetos metálicos e tungstênio. Esse valor demonstrou que a densidade do material permaneceu dentro do intervalo esperado, considerando sua composição química, que inclui elementos de liga como o Cromo duro (Cr), cuja densidade é de aproximadamente 7,2 g/cm³. Esses dados confirmam o aumento da densidade global com a aplicação do revestimento e subsidiaram os cálculos do volume médio removido (Vr), apresentado na Fig. 6 para o SAE 4140, cromo duro e WC-10Co-4Cr. A Fig. 6 é apresentado os resultados comparativos do desgaste para os três materiais em diferentes condições de fabricação.

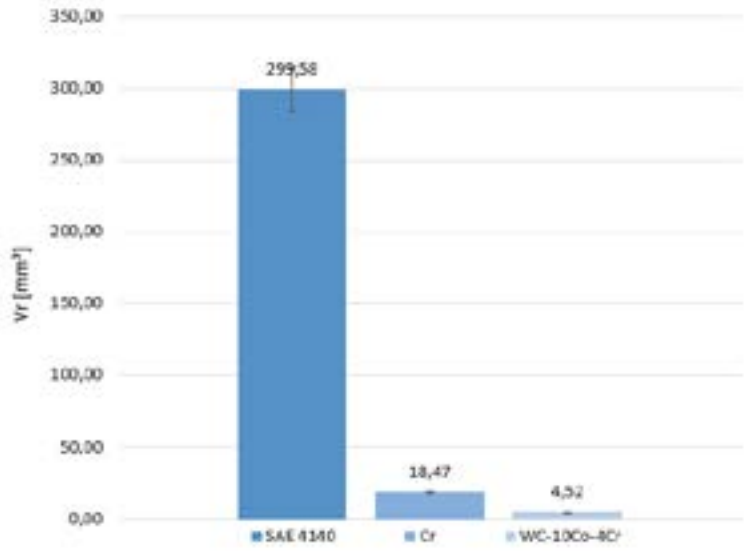


Figura 6: Volume removido do material para os revestimentos após os ensaios de desgaste abrasivo conforme ASTM G65.

Tabela 4: Resultados obtidos para o coeficiente de desgaste e estimativa de vida para cada material analisado após os ensaios de desgaste.

Amostras/Liga	Taxa de desgaste Q/L (mm³/m)	Coeficiente de desgaste - K	Estimativa de vida útil (horas)
SAE 4140	0,0695	1,48 x $\mathbf{10^{-3}}$	6,46E-02
Cromo duro (Cr)	0,0049	2,93 x $\mathbf{10^{-4}}$	1,05E+00
Wc-10Co-4Cr	0,0010	1,12 x $\mathbf{10^{-4}}$	4,28E+00

Os resultados confirmaram a alta efetividade dos revestimentos na redução do desgaste do aço SAE 4140. O substrato não tratado apresentou elevada remoção de material (0,0695 mm³/m), enquanto o cromo duro reduziu o desgaste em 94,4% (0,0049 mm³/m) e o WC-10Co-4Cr em 97,6% (0,0010 mm³/m), destacando-se como a solução inicial mais eficiente. Mesmo com a variação experimental, a superioridade dos revestimentos, em especial o produzido de tungstênio teve a menor taxa de desgaste.

Outros estudos já relatavam a superioridade de revestimentos à base de WC-Co-Cr em ambientes abrasivos de três corpos, devido à elevada dureza dos carbonetos e à forte ancoragem proporcionada pela matriz metálica [5]. Além disso, o coeficiente de desgaste (K) deste presente estudo também reforçou essa evidência: o SAE 4140

apresentou o maior valor ($1{,}48\times10^{-3}$), seguido pelo cromo duro ($2{,}93\times10^{-4}$) e pelo WC-10Co-4Cr ($1{,}12\times10^{-4}$). Quanto menor o coeficiente, maior a resistência ao desgaste, sendo o WC-10Co-4Cr aproximadamente 100 vezes mais resistente que o aço SAE 4140. Resultados semelhantes foram reportados para o método de HVOF, em que carbonetos demonstraram taxas de desgaste até duas ordens de magnitude menores que substratos não revestidos, confirmando o ganho tecnológico desse tipo de deposição [8].

REFERENCES

[1] HUTCHINGS, I.; SHIPWAY, P. Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials. 2nd ed. Butterworth-Heinemann, 2017.

[2] BLAU, P. J. Friction Science and Technology: From Concepts to Applications. CRC Press, 2008.

[3] PETRAZZINI, Igor Mateus Bronzatti. Aumento de produtividade em uma linha de produção de cerâmica. Aumento de produtividade em uma linha de produção de cerâmica, UFSC, p. 22-23, 14 fev. 2014.

[4] STACHOWIAK, G. W.; BATCHELOR, A. W. Engineering Tribology. 4th ed. Butterworth-Heinemann, 2014.

[5] MENG, H. C.; LUDEMA, K. C. Wear models and predictive equations: their form and content. Wear, v. 181–183, p. 443–457, 1995.

[6] ROJAS, E.; VERGARA, V.; SOTO, R. Case study: Discrete element modeling of wear in mining hoppers. Wear, v. 430–431, p. 120–125, 2019.

[7] ARA, M. H. Efeito do tamanho da partícula abrasiva e da microestrutura de aços e ferros fundidos na severidade do desgaste em tribômetro roda de borracha. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica da USP, São Paulo, 2023.

[8] PICAS, J. A.; FORN, A.; IGUALADA, C.; MARTÍNEZ, D. Wear resistant coatings for high temperature applications. Surface & Coatings Technology, v. 201, n. 3–4, p. 1352–1357, 2006.

[9] ESPALLARGAS, N. Future Development of Thermal Spray Coatings: Types, Designs, Manufacture and Applications. Elsevier, 2020.

[10] SUNDARARAJAN, G.; SAMPATH, S. Thermal Spray Coatings: Research Design and Applications. ASM International, 2013.

[11] BMR. BMR – Máquinas e sistemas para a indústria cerâmica. Scandiano: BMR, s.d. Disponível em: https://www.bmr.it/pt-br/. Acesso em: 02 de abril de 2025.

[12] SILVA, Sergio Mauricio Alves da. Influência da pré-microestrutura sobre a resistência ao desgaste abrasivo de aços SAE 1045 submetidos à têmpera por indução. 2022. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2022.

[13] ARCHARD JF. Contact and rubbing of flat surface. Journal of Applied Physics. 1953;24:981-988.

[14] CALLISTER, W. D., & RETHWISCH, D. G. (2018). Materials Science and Engineering: Na Introduction (10th ed.). Wiley. — Livro clássico de ciência dos materiais que aborda propriedades de ligas de aço, incluindo densidade.

44º SENAFOR

28ª Conferência Internacional de Forjamento - Brasil
14ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas / 11º Congresso do BrDDRG
14ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis
3ª Conferência Internacional de Inovação em Materiais e Manufatura
Porto Alegre, RS, dias 1, 2 e 3 de outubro de 2025
www.senafor.com

Desenvolvimento e Caracterização de Estruturas em Aço Baixo Liga Produzidas por WAAM.

Aline Cipriano [1]
Célia de Fraga Malfatti [2]
Henrique Cechinel Casagrande [3]
Anderson Daleffe [4]
Jovani Castelan [5]
Gilson de March [6]
Joélson Vieira da Silva [7]

RESUMO

O presente estudo avaliou o desempenho do arame HL 85 MC-B em processos de Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM), considerando propriedades mecânicas e composição química. Ensaios de tração realizados em diferentes direções de deposição revelaram resistência máxima de 724 MPa em 0°, 799 MPa em 45° e 810 MPa em 90°, com alongamentos correspondentes de 8,73 % a 7,10 %, indicando anisotropia e maior rigidez na direção perpendicular à deposição. A composição química do arame apresentou conformidade com as especificações Böhler, com teores de C (0,094 %), Si (0,359 %), Mn (1,499 %), P (0,013 %), S (0,008 %), Cr (0,567 %), Mo (0,386 %) e Ni (1,782 %), garantindo equilíbrio entre resistência, tenacidade e soldabilidade. Os resultados demonstram que o HL 85 MC-B, aliado ao controle de parâmetros de WAAM, permite a produção de componentes estruturais com elevado desempenho mecânico e confiabilidade. A combinação de resistência e ductilidade, confirma a viabilidade do arame para aplicações críticas, destacando-se como uma alternativa eficaz em manufatura aditiva de alta resistência.

(1) Doutoranda em Eng. Minas, Metalurgia e Materiais – UFRGS. E-mail: aline.cipriano@satc.edu.br
(2) Dr. Em Eng. Minas, Metalurgia e Materiais – UFRGS. E-mail: materialxenergia@gmail.com
(3) Doutorando em Ciência e Engenharia de Materiais- UFSC. E-mail: henrique_cechinel@hotmail.com
(4) Dr. Em Eng. Minas, Metalurgia e Materiais – UFRGS. E-mail: anderson.daleffe@satc.edu.br
(5) Dr. Em Eng. Minas, Metalurgia e Materiais – UFRGS. E-mail: jovani.castelan@satc.edu.br
(6) Doutorando em Eng. Minas, Metalurgia e Materiais – UFRGS. E-mail: gilson.march@satc.edu.br
(7) Doutoranda em Eng. Minas, Metalurgia e Materiais – UFRGS. E-mail: Joelson.silva@satc.edu.br

Key words — WAAM; Aços de baixa liga; Ensaio mecânico de tração; Análise química.

1. INTRODUÇÃO

O processo Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM) tem se consolidado como uma das rotas mais promissoras de manufatura aditiva metálica, destacando-se pela alta taxa de deposição, baixo custo de matéria-prima e possibilidade de fabricar componentes de grandes dimensões com excelente aproveitamento de material [1][2][3][4]. Estudos recentes evidenciam a versatilidade do processo em diferentes ligas, como os aços de baixo carbono [5][6], aplicados em protótipos e reparos estruturais, e os aços inoxidáveis austeníticos [7][8]. Avanços importantes também incluem o desenvolvimento de estratégias híbridas, que combinam o WAAM com o forjamento subsequente [9][10], resultando em refino microestrutural e melhoria significativa das propriedades mecânicas. Além disso, pesquisas em estruturas bimetálicas [11][12] produzidas por WAAM demonstram o potencial do processo em criar gradientes de propriedades, combinando resistência mecânica e resistência à corrosão em um mesmo componente, o que amplia as aplicações industriais da tecnologia.

Neste trabalho, propõe-se a aplicação do processo WAAM em aços de baixa liga, explorando seu potencial para fabricação de componentes com elevada resistência mecânica e bom equilíbrio entre custo e desempenho. A escolha desse material se justifica pelo amplo uso industrial, especialmente em estruturas de grande porte sujeitas a desgaste e carregamentos dinâmicos. A proposta busca avaliar a viabilidade do WAAM na produção de geometrias complexas e peças de grande dimensão. Assim, pretende-se contribuir para a consolidação do WAAM em aços de baixa liga como alternativa competitiva frente a processos convencionais, ampliando o espectro de aplicações dessa tecnologia em setores estratégicos como energia, transporte e mineração.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Preparação das amostras

Neste estudo, empregou-se o processo WAAM para a fabricação de paredes em aço de baixo carbono denominado HL 85 MC-B. Foram construídas três paredes com dimensões aproximadas de 130 × 130 × 10 mm (milímetros), utilizando arame de 1,2 mm de diâmetro fornecido pela fabricante Böhler. O sistema de deposição contou com um robô industrial YASKAWA, integrado a uma fonte de soldagem da Lincoln Electric. A Figura 1 apresenta o arranjo experimental adotado na etapa de manufatura aditiva.

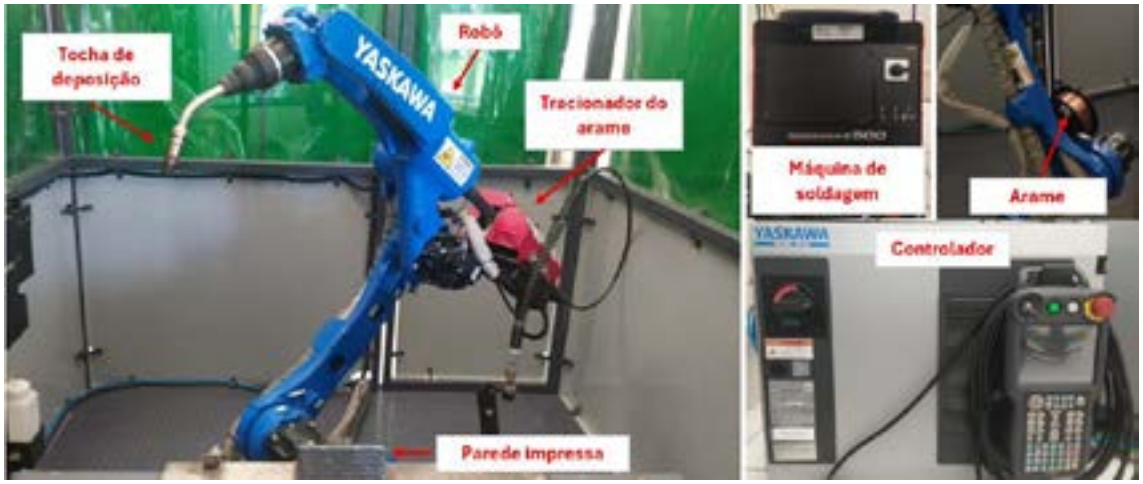


Figura 1: Robô industrial Yaskawa para manufatura aditiva.

Na Tabela 1 são apresentados os valores adotados para os parâmetros de soldagem, bem como as condições de deslocamento do robô durante o processo de deposição. O gás de proteção utilizado para este estudo, foi a junção entre 85% de Ar (argônio) e, 15% de CO_2 (dióxido de carbono), caracterizando assim o processo MAG.

Foram impressas três paredes com dimensões distintas, a partir das quais foram retirados corpos de prova em diferentes orientações. Essa abordagem teve como finalidade avaliar o comportamento anisotrópico das camadas depositadas pelo processo WAAM, estabelecendo a correlação entre a direção de construção e as propriedades mecânicas e microestruturais obtidas.

Tabela 1: Parâmetros de soldagem.

Parâmetros:	**Valores:**
Tensão (V)	20
Corrente (A)	173
Vazão do gás (l/min)	15
Velocidade do arame (m/min)	6
Velocidade do CNC (m/min)	0,3

A tabela 2 representa as dimensões das paredes após o processo de manufatura aditiva. Ressalta-se que os valores na tabela 2 são a média entre as três paredes impressas.

Tabela 2: Valores das paredes após a Manufatura Aditiva.

Variáveis:	**Valores:**
Largura da parede (mm)	11
Altura por deposição (mm)	2,8
Número de deposições (por parede)	46
Tempo total para deposição (min) (por parede)	20

2.2 Paredes produzidas por WAAM

A Figura 2 apresenta a parede impressa pelo processo WAAM utilizando como consumível o arame de soldagem HL 85 MC-B, depositada sobre substrato metálico

de aço SAE 1020. Observa-se a definição das camadas sucessivas de deposição e a indicação das regiões de retirada dos corpos de prova. Foram adotadas três orientações principais em relação ao eixo de construção: 0° (paralelo às camadas depositadas), 45° (diagonal em relação às camadas) e 90° (perpendicular ao plano das camadas). Essa estratégia permitiu a preparação de amostras em diferentes direções, de modo a investigar o comportamento anisotrópico das propriedades mecânicas e microestruturais resultantes do processo. Os corpos de prova para ensaio mecânico de tração estão conforme a norma ASTM E8 [13]. Na Figura 2 destaca-se as dimensões dos corpos de prova.

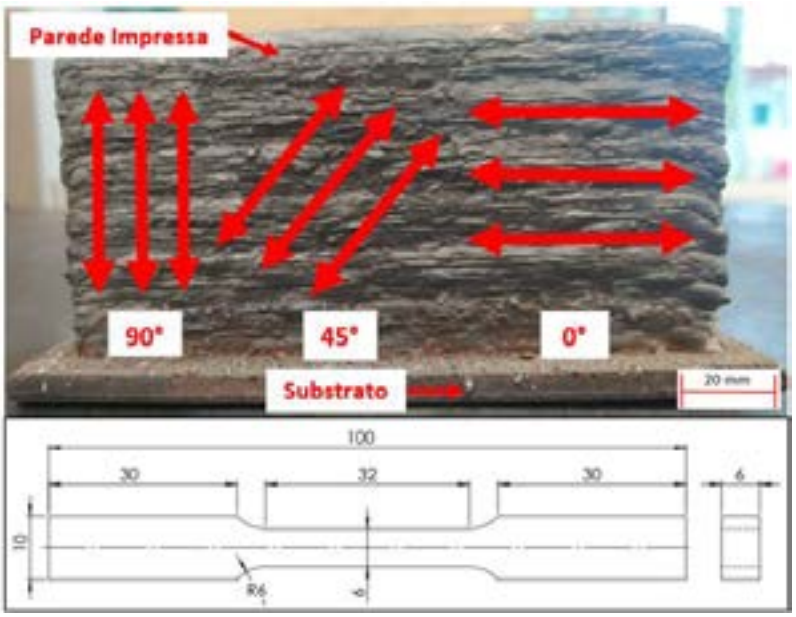


Figura 2: Parede produzida por MA para avaliação anisotrópica conforme ASTM E8.

2.3 Ensaio mecânico de tração

Os ensaios de tração foram conduzidos com velocidade de avanço de 5 mm/min, em uma máquina universal de ensaios InterMetric GR173, com capacidade nominal de 200 kN. A preparação dos corpos de prova foi realizada inicialmente em uma fresadora ROMI U30 e, posteriormente, submetida a um processo de retificação em equipamento Mello P36, com o objetivo de reduzir a rugosidade superficial. O corte final das amostras, conforme a norma ASTM E8, foi executado em uma máquina de corte a laser AMADA FLC 3015 AJ. Para a análise da anisotropia do material produzido por WAAM, as amostras de tração foram retiradas em três direções distintas em relação ao cordão de deposição (0°, 45° e 90°). Cada condição foi ensaiada em triplicata, garantindo robustez estatística na avaliação das propriedades mecânicas.

2.4 Espectrometria de emissão óptica

Para a análise por espectrometria de emissão óptica (OES), foi utilizado um espectrômetro modelo BRUKER Q2 ION, operando a 400 Watts por 30 s (segundos). A amostra foi inicialmente seccionada em um cortador metalográfico Struers, modelo

MESOTOM. Em seguida, foi usinada em uma fresadora Romi U30, e posteriormente submetida à retificação em uma máquina Mello P36, com o objetivo de reduzir a rugosidade superficial.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Ensaio mecânico de tração

A Figura 3 apresenta os resultados do ensaio mecânico de tração do arame HL 85 MC-B processado por WAAM, com extração dos corpos de prova em diferentes orientações em relação ao cordão depositado (0°, 45° e 90°). Observa-se que todas as condições apresentam comportamento típico de materiais dúcteis, com região elástica bem definida seguida por um escoamento plástico considerável até a fratura. A orientação 90° apresentou maior tensão limite de resistência (810 MPa), evidenciando maior desempenho mecânico quando o carregamento é aplicado perpendicularmente às camadas depositadas. Já a orientação 0° mostrou menor resistência à tração (724 MPa), possivelmente associada à maior influência das interfaces de deposição na propagação de trincas. A condição intermediária, 45°, apresentou comportamento próximo ao da amostra em 90°, indicando que a direção de retirada exerce influência significativa na resposta mecânica, mas com menor discrepância entre 45° e 90°. Quanto ao alongamento, nota-se uma deformação plástica superior a 8%, o que confirma a boa ductilidade do material, ainda que com leve redução na condição de 90°, sugerindo fratura mais precoce após atingir altas tensões.

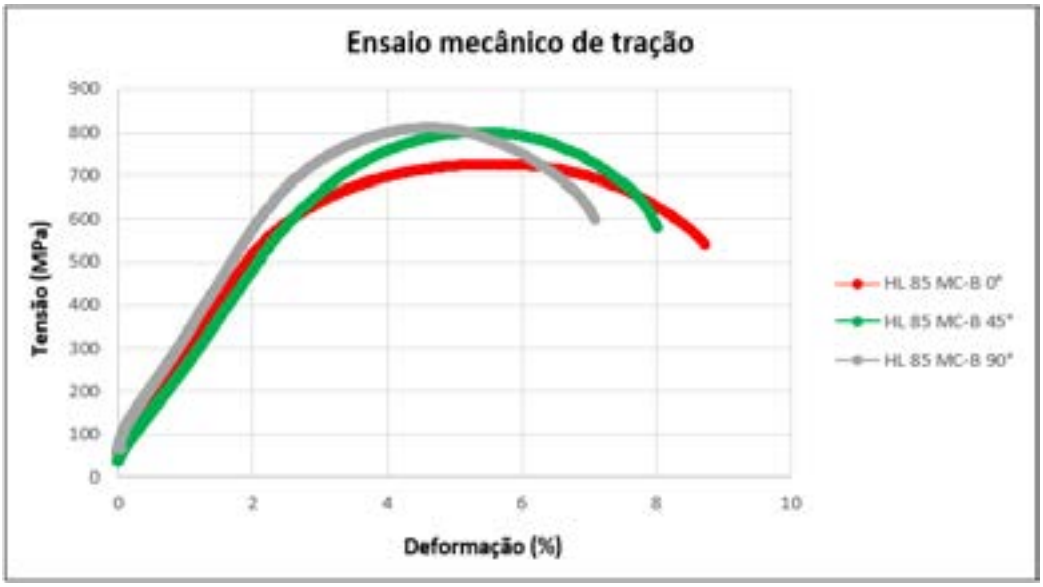


Figura 3: Ensaio mecânico de tração em 0°, 45° e 90°.

A Tabela 3 detalha os valores para as três condições estudadas (0°, 45° e 90°), evidenciando assim um comportamento anisotrópico para o consumível HL 85 MC-B.

Tabela 3: Resultados ensaio mecânico de tração.

Direção:	Tensão Esc. (MPa):	Tensão Máx. (MPa):	Alongamento (%):
0°	598	724	8,73
45°	648	799	8,03
90°	671	810	7,10

Ao comparar os resultados obtidos com os valores de referência para o aço estrutural ASTM A992 [14], que possui composição química similar, nota-se uma diferença significativa em termos de resistência mecânica e ductilidade. Enquanto o ASTM A992 apresenta limite de escoamento médio em torno de 345 MPa, tensão máxima de aproximadamente 450 MPa e alongamento na faixa de 18 a 21%, o material depositado por WAAM com o arame HL 85 MC-B exibiu desempenho superior em resistência, alcançando valores de 598 a 671 MPa para limite de escoamento e de 724 a 810 MPa para resistência máxima. Por outro lado, o alongamento obtido variou entre 7,1 e 8,7%, consideravelmente inferior ao aço A992, evidenciando o efeito da anisotropia e da natureza do processo de deposição em camadas, que favorece o ganho de resistência em detrimento da ductilidade.

3.2 Espectrometria de emissão óptica

A Tabela 4 apresenta a composição química obtida por espectrometria de emissão óptica da amostra produzida com o arame de soldagem BÖHLER HL 85 MC-B, comparada aos valores de referência fornecidos pelo fabricante [15]. Os resultados indicam que os teores de C (0,094%), Si (0,359%), Mn (1,499%), Cr (0,567%) e Mo (0,386%) estão bastante próximos dos valores especificados, demonstrando boa conformidade com a faixa nominal do material. Os elementos residuais P (0,013%) e S (0,008%) encontram-se abaixo do limite máximo permitido (<0,025%), o que é positivo, já que baixos teores desses elementos reduzem a suscetibilidade a fragilização e trincas a quente. A principal diferença observada está no teor de Ni (1,782%), inferior ao valor de referência (2,2%), o que pode estar associado a segregação deste elemento após o processo de MA. Apesar dessa redução, o teor de níquel ainda se mantém em nível adequado para garantir a contribuição esperada ao aumento da tenacidade. O ferro (Fe) permanece como elemento de equilíbrio (balanço), confirmando a matriz predominantemente ferrítica/perlítica do material.

Tabela 4: Resultados de espectroscopia de emissão óptica.

Elementos:	Valores (%):	BÖHLER [15]:
Carbono (C)	0,094	0,07
Silício (Si)	0,359	0,4
Manganês (Mn)	1,499	1,4
Fósforo (P)	0,013	<0,025
Enxofre (S)	0,0080	<0,025
Cromo (Cr)	0,567	0,5
Molibdênio (Mo)	0,386	0,4
Níquel (Ni)	1,782	2,2
Ferro (Fe)	Bal.	Bal.

4 CONCLUSÕES

Os ensaios de tração do arame HL 85 MC-B mostraram resistência máxima crescente do depósito em 0° (724 MPa) para 45° (799 MPa) e 90° (810 MPa), enquanto o alongamento variou de 8,73 % a 7,10 %, indicando comportamento anisotrópico com maior rigidez na direção perpendicular. A análise química confirma conformidade com as especificações Böhler, apresentando teores adequados de C (0,094 %), Si (0,359 %), Mn (1,499 %), P (0,013 %), S (0,008 %), Cr (0,567 %), Mo (0,386 %) e Ni (1,782 %), garantindo um equilíbrio entre resistência, tenacidade e processabilidade. Esses resultados demonstram que o HL 85 MC-B combina elevada resistência mecânica com boa ductilidade e controle químico, tornando-o adequado para aplicações estruturais críticas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Centro Universitário – UNISATC pelo apoio a pesquisa através do uso de sua estrutura de laboratórios, e a Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina – FAPESC pelo apoio financeiro na compra de equipamentos e insumos para a pesquisa.

5 REFERÊNCIAS

[1] GARDNER, J. Metal additive manufacturing in structural engineering – review, advances, opportunities and outlook. Structures. Volume 47, 2023, Pages 2178-2193.
[2] YUSUF, S.M., CUTLER, S., GAO, N. Review: The Impact of Metal Additive Manufacturing on the Aerospace Industry. Metals. Volume 12, 2019.
[3] MENG, X., GARDNER, L. Hybrid construction featuring wire arc additive manufacturing: review, concepts, challenges and opportunities. Engineering Structures. Volume 326, 2025.
[4] FERREIRA, C., DALEFFE, A., CASAGRANDE, H., MARCH, G., MARTINS, H., SCHAEFFER. Mechanical analysis of er70s-6 wire in pulsed additive manufacturing. RGSA – Revista de Gestão Social e Ambiental. Volume 19, 2025.
[5] CASAGRANDE, H.C., DALEFFE, A., FERREIRA, C., FRITZEN, D., MARCH, G., CASTELAN, J. Processo de fabricação de peças metálicas por manufatura aditiva com fusão localizada de aços baixa liga. Open Science Research XI. Volume 11, 2023, 997-1008.
[6] POSSAMAI, P.H.M., DALEFFE, A., CASAGRANDE, H.C., FERREIRA, C., SCHAEFFER, L., BILESSIMO, L. Study of the additive manufacturing process by localized melting for e71t-1 and er70s-6 alloys. RGSA – Revista de Gestão Social e Ambiental. Volume 19, 2025, 1-13.
[7] MARCH, G., DALEFFE, A., CASAGRANDE, H., FERREIRA, C., SCHAEFFER, L., MILANEZ, A. Additive manufacturing by arc deposition: study of mechanical and chemical properties with stainless steel electrode er 310. RGSA – Revista de Gestão Social e Ambiental. Volume 19, 2025, 1-15.
[8] CIPRIANO, A., MALFATTI, C.F., CASAGRANDE, H.C., DALEFFE, A., CASTELAN, J., POSSAMAI, P.H.M. Analysis of the Microstructure and Mechanical Properties of Austenitic Stainless Steel 310 Manufactured via WAAM. Materials, Volume 18, 2025.
[9] FERREIRA, C.; SCHAEFFER, L.; DALEFFE, A.; CASTELAN, J.; CASAGRANDE, H.; MARCH, G.M.A. Hybrid Manufacturing Process and Hot Forging: Preform Manufacturing Through Localized Melting Material Deposition Using UTP AF DUR 600 Wire. *RGSA J. Soc.* Environ. Manag, Volume 19, 2025.
[10] CASAGRANDE, H.C.; DALEFFE, A.; FERREIRA, C.A.; MILANEZ, A.; MARCH, G.; SCHAEFFER, L. Additive Manufacturing in the Forging Process: Preform Manufacturing Through Localized Melting Material Deposition Using Low Carbon Wire. RGSA J. Soc. Environ. Manag. Volume 19, 2025.
[11] SILVA, J.V., DALEFFE, A., SCHAEFFER, L., CASTELAN, J., CASAGRANDE, H.C., FERREIRA, C. Study of the mechanical joint of a bimetallic cross obtained by localized additive manufacturing of fusion applied to automotive transmissions. RGSA J. Soc. Environ. Manag. Volume 19, 2025.
[12] SILVA, J.V., SCHAEFFER, L., DALEFFE, A., MILANEZ, A., CASAGRANDE, H.C., MARCH, G. Analysis of the Bimetallic Joint of a Hot-Forged Crosshead Composed of ASTM B221 6060 Aluminum

and AWS A5.36 E110C-G M Low Alloy Steel Obtained by Localized Fusion Additive Manufacturing. Materials Research, Volume 28, 2025.
[13] ASTM E8; Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2024.
[14] ASTM A992/A992M-20. *Standard Specification for Structural Steel Shapes*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020.
[15] AWS A5,28. BÖHLER HL 85 T-MC-B. Arame tubular metalcored, aço baixa-liga, alta resistência.

44º SENAFOR

28ª Conferência Internacional de Forjamento - Brasil
14ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas / 11º Congresso do BrDDRG
14ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis
3ª Conferência Internacional de Inovação em Materiais e Manufatura
Porto Alegre, RS, dias 1, 2 e 3 de outubro de 2025

www.senafor.com

AVALIAÇÃO TRIBOLÓGICA DE EMULSÃO BIODEGRADÁVEL À BASE DE ÓLEO VEGETAL APLICADA VIA MQL EM ENSAIO PINO-SOBRE-DISCO

Alice do A. Rodrigues [1]
Régis H. Silva Souza [1]
Guilherme V. Schirmer [2]
André J. Souza [2]
Germano Lasch [1]
Liu Y. de Barros [2]
Paola Stradolini [3]
Cesar L. Petzhold [3]
Ney F. Ferreira [1]
Patric D. Neis [1]

RESUMO

A busca por processos de manufatura mais limpa tem impulsionado o desenvolvimento de novas tecnologias e materiais. Na área de usinagem, os fluidos de corte tradicionais, derivados do petróleo, vêm sendo gradualmente substituídos por fluidos biodegradáveis, não tóxicos e ambientalmente amigáveis. Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho tribológico de uma emulsão à base de óleo vegetal, aplicada por meio da técnica de Mínima Quantidade de Lubrificação (MQL), em ensaios realizados em tribômetro do tipo pino-sobre-disco. Os testes foram conduzidos a partir de pinos e discos fabricados em aço SAE 52100. Para isso, a emulsão vegetal é comparada a uma emulsão comercial semissintética. Ambos os fluidos foram aplicados via MQL a uma vazão de 150 mL/h. Para cada fluido, foram executados três testes, mantendo-se carga, rotação e tempo constantes. A influência de cada emulsão foi avaliada a partir da marca de desgaste dos pinos e do coeficiente de atrito mensurado durante os testes. Por fim, após uma análise estatística dos resultados, não é possível afirmar que há diferença estatística entre a emulsão vegetal e a emulsão semissintética quanto ao desgaste dos pinos e ao coeficiente de atrito para a condição testada. Isso mostra o potencial tribológico da emulsão vegetal, abrindo espaço para seu emprego em aplicações de engenharia, como em fluido de corte de usinagem.

Palavras-chaves: Biolubrificante, Emulsão vegetal, MQL, Desgaste.

[1] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Laboratório de Tribologia, Porto Alegre, RS, Brasil.
[2] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Laboratório de Automação em Usinagem, Porto Alegre, RS, Brasil.
[3] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Química, Porto Alegre, RS, Brasil.

ABSTRACT

The demand for cleaner manufacturing processes has driven the development of new technologies and materials. In the machining, traditional petroleum-based cutting fluids have been gradually replaced by biodegradable, non-toxic, and environmentally friendly alternatives. In this context, the present study aims to evaluate the tribological performance of a vegetable oil-in-water emulsion, applied through the Minimum Quantity Lubrication (MQL) technique, in tests on a pin-on-disk tribometer. The experiments were conducted using pins and disks manufactured in SAE 52100 steel material. For comparison, the vegetable oil-in-water emulsion was tested against a commercial semi-synthetic emulsion. Both fluids were applied via MQL at a flow rate of 150 mL/h. Three tests were performed for each fluid, under constant load, rotation, and time. The influence of each emulsion was based on the wear scar on the pins and the friction coefficient measured during testing. Finally, after statistical analysis of the results, it was not possible to confirm a statistically significant difference between the vegetable oil-in-water emulsion and the semi-synthetic emulsion regarding pin wear and friction coefficient under the tested conditions. These findings highlight the tribological potential of the vegetable emulsion, suggesting its applicability in engineering uses, such as a cutting fluid in machining operations.

Key-words: Biolubricant, Vegetal Oil-in-water Emulsion, MQL, Wear.

1. INTRODUÇÃO

O apelo por processos e tecnologias mais limpas vem ganhando força mundialmente. Especificamente na usinagem, umas das grandes áreas dentro dos processos de manufatura, uma das preocupações está voltada para os fluidos de corte. Estes desempenham um papel vital na eficiência do processamento e na qualidade superficial das peças usinadas, atuando na lubrificação e refrigeração da interface ferramenta-peça-cavaco, além de auxiliar na remoção de cavacos [1].

Globalmente, cerca de 2 bilhões de litros de fluidos de corte são consumidos anualmente nos processos de fabricação [2]. Entretanto, devido à maioria dos fluidos de corte ser à base de petróleo, seu uso pode ser associado a diversos problemas, incluindo riscos à saúde dos operadores, como doenças respiratórias e de pele [3], e significativos impactos ambientais, como a poluição do solo, ar e água, devido à sua toxicidade e baixa biodegradabilidade [4]. Nesse cenário, como alternativa para os fluidos de corte de origem petrolífera (fluidos tradicionais), surgem estudos voltados ao emprego de fluidos de origem vegetal. Estes são considerados ecológicos, renováveis, altamente biodegradáveis e não tóxicos [5]. Tradicionalmente, os fluidos de corte são caracterizados por emulsões aquosas compostas por um percentual entre 5% e 10% de óleo base. Além disso, as emulsões podem conter aditivos como emulsificantes, aditivos anti-desgaste, biocidas e inibidores de corrosão [6].

Junto à aplicação de fluidos vegetais, a técnica de Mínima Quantidade de Lubrificação (MQL) tem se destacado como uma forma mais a sustentável de lubri-refrigeração. Diferentemente do sistema por inundação, ou lubrificação abundante, que exige uma alta vazão de fluido, a técnica MQL utiliza uma vazão muito baixa, geralmente entre 50 mL/h e 500 mL/h [7]. A técnica MQL consiste em injetar fluido e ar comprimido diretamente na zona de corte em forma de névoa com gotículas muito pequenas [8]. Assim, a quantidade de fluido de corte necessária durante as operações é reduzida, proporcionando benefícios ambientais e econômicos.

Nesse contexto, o presente trabalho avalia, inicialmente, o desempenho tribológico de uma emulsão à base de óleo vegetal em tribômetro do tipo pino-sobre-disco, aplicada por meio da técnica de Mínima Quantidade de Lubrificação (MQL). Foram analisados dois fluidos lubri-refrigerantes distintos: emulsão semissintética e emulsão vegetal. Para cada fluido, foram executados três ensaios, mantendo-se carga, rotação e tempo constantes. Para fins comparativos, o desgaste dos pinos e o coeficiente de atrito médio dos testes foram analisados estatisticamente por meio do Teste U de Mann-Whitney ou Teste de Wilcoxon Independente, permitindo avaliar a influência tribológica de cada emulsão.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os corpos de prova (pino e disco) utilizados nos testes tribológicos foram fabricados em aço SAE 52100, e suas rugosidades médias (Ra) foram mantidas em aproximadamente 0,200 μm. As superfícies dos discos e pinos possuem diâmetros de 46 mm e 12 mm, respectivamente. Além disso, o pino possui um raio de curvatura de 200 mm na extremidade de contato.

Referente aos fluidos lubri-refrigerantes, a emulsão vegetal foi fornecida pelo Laboratório de Síntese de Polímeros da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (SINPOL). Essa emulsão é resultado da diluição do óleo base vegetal em água, na proporção de 1% em peso, sem a necessidade de emulsificantes ou incorporação de aditivos. Já a emulsão semissintética foi formulada a partir da diluição do fluido comercial Quimatic (ME-1), na proporção de 5% em peso, de acordo com as instruções para uso geral fornecidas pelo fabricante. Vale ressaltar que o fluido comercial possui aditivos além do óleo mineral, como emulsificantes, anticorrosivos, estabilizantes e biocidas em sua composição.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Tribologia (LATRIB) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), em um tribômetro do tipo pino-sobre-disco, desenvolvido por Neis (2012) [9]. Esse equipamento permitiu estimar o coeficiente de atrito (μ) do contato pino-disco durante os testes. A determinação do coeficiente de atrito foi realizada de forma indireta, a partir das medições fornecidas pelos sensores de carga e torque acoplados ao tribômetro. Dessa forma, a força de atrito foi calculada através do quociente entre o torque frenante (obtido pela célula de torque acoplada ao eixo do tribômetro) e o produto do raio de deslizamento pela força normal aplicada (medida pela célula de carga). O esquemático de funcionamento do equipamento é apresentado na Figura 1a. Junto ao tribômetro, a técnica de Mínima Quantidade de Lubrificação (MQL) foi implementada utilizando o nebulizador Quimatic® Nebulizer IV, mostrado na Figura 1b.

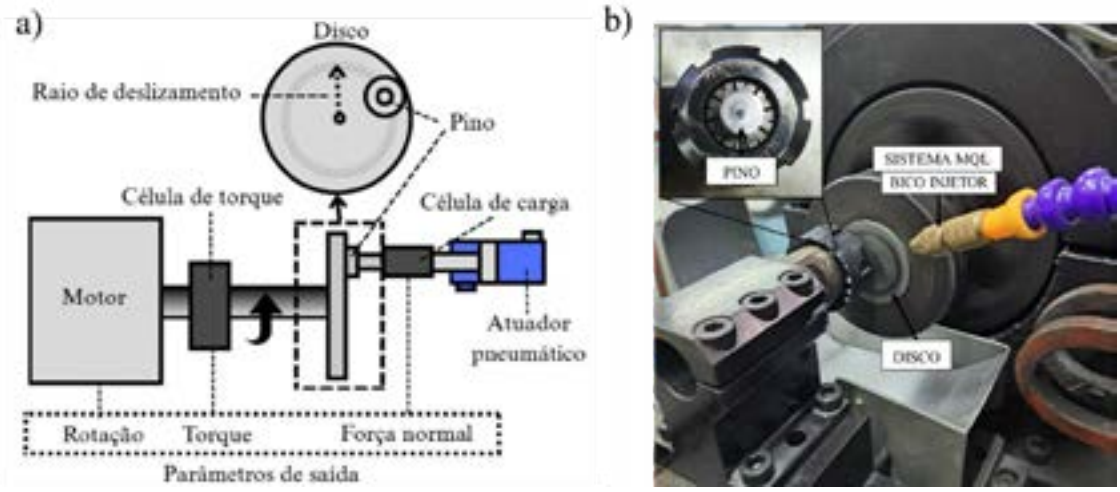


Figura 1. Ensaio tribológico pino-sobre-disco: a) esquemático de funcionamento, e b) imagem do tribômetro com o nebulizador Quimatic® acoplado.

O procedimento experimental consistiu em três testes tribológicos para cada emulsão, sob carga, rotação e tempo constantes. Além disso, a vazão de aplicação dos fluidos (emulsão e ar) foi mantida em 150 mL/h para todos os ensaios. Os parâmetros constantes dos testes são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros constantes dos testes tribológicos.

Carga [N]	**Tensão hertziana média [MPa]**	**Rotação angular [rpm]**	**Velocidade de deslizamento [m/s]**	**Raio de deslizamento [mm]**	**Tempo [s]**	**Vazão do fluido [mL/h]**
150	142	280	0.5	17	600	150

Após os ensaios, a influência de cada fluido lubri-refrigerante foi avaliada com base na marca de desgaste dos pinos e no coeficiente de atrito registrado durante os testes. Com base no diâmetro médio da marca de desgaste, medida com auxílio do estereomicroscópio óptico da marca Zeiss® (modelo Stemi 508), estimou-se o volume médio de material removido de cada pino (V_{Pino}), utilizando a Equação 1 e Equação 2, conforme especificado na Norma ASTM G99 [10]. Para o emprego destas equações, assumiu-se que o desgaste da contraparte (disco) foi insignificante.

$$V_{Pino} = \frac{\pi h}{6}\left(\frac{3 \times d^2}{4} + h^2\right) \quad (1)$$

$$h = r - \left(r^2 - \frac{d^2}{4}\right)^{1/2} \quad (2)$$

Onde:
d: diâmetro da marca de desgaste medida na superfície do pino;
r: raio de curvatura do pino em formato esférico;
h: profundidade da marca de desgaste.

Com os resultados de desgaste dos pinos e dos coeficientes de atrito, realizou-se uma análise estatística para verificar se as emulsões testadas apresentavam diferenças significativas. Para isso, foi aplicado o Teste Wilcoxon Independente para pequenas amostras, um teste não paramétrico que compara duas amostras independentes [11]. A

partir disso, definiu-se como hipótese nula (H_0) que não há diferença significativa entre as emulsões, ou seja, ambas apresentam comportamento semelhante em relação ao desgaste e ao coeficiente de atrito. A hipótese alternativa (H_1) assume que existe diferença significativa entre elas. Considerou-se um nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$), de modo que valores de p-valor < 0,05 indicam que há diferença estatisticamente significativa, enquanto valores de p-valor ≥ 0,05 indicam a ausência de evidências suficientes para rejeitar a hipótese nula.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 apresenta as imagens de desgaste (Figura 2a) e os diâmetros médios de desgaste dos pinos (Figura 2b) obtidos após os ensaios tribológicos para os dois fluidos lubri-refrigerantes testados. Os desvios-padrão dos diâmetros médios também são indicados na Figura 2b através das barras de erros. A partir dos diâmetros das marcas de desgaste foi possível estimar o volume médio de material removido (V_{Pino}) para a emulsão semissintética e para a emulsão vegetal, de acordo com a Norma ASTM G99, como mostrado na Figura 3. Com base nestes resultados, é possível notar que os testes com a emulsão vegetal produziram uma marca média de desgaste dos pinos ligeiramente menor (9.4%) do que os testes com a emulsão semissintética. Já considerando o volume médio de material removido estimado pela norma, a emulsão vegetal perdeu 26.2% menos material do que a emulsão semissintética. Entretanto, analisando os desvios-padrão entre as medições dos testes executados, tanto para o diâmetro da marca quanto para o volume de material removido do pino, não é possível afirmar que a emulsão vegetal possui um desempenho tribológico superior à emulsão semissintética. Diante disso, tornou-se necessária a realização de uma análise estatística mais aprofundada.

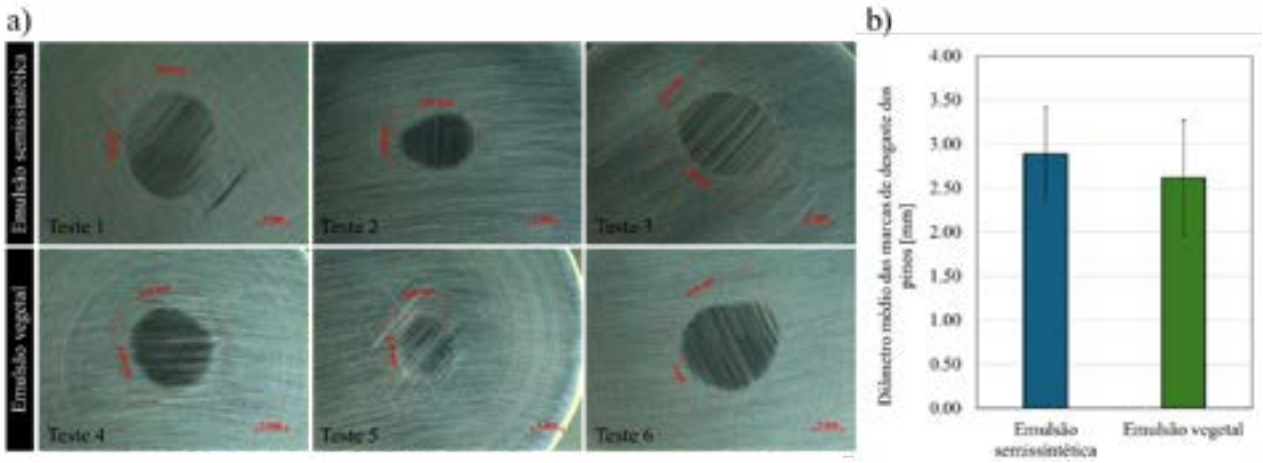


Figura 2. Resultados das marcas de desgaste dos pinos: a) imagem dos diâmetros medidos em cada pino, e b) diâmetro médio de desgaste para cada fluido lubri-refrigerante.

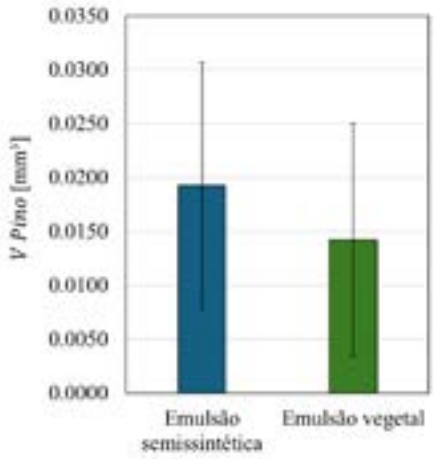


Figura 3. Volume médio de material removido do pino (V_{Pino}) para cada fluido lubri-refrigerante.

A Figura 4 mostra o gráfico do coeficiente de atrito de cada um dos testes executados (Figura 4a) e o coeficiente de atrito médio de cada fluido lubri-refrigerante (Figura 4b), incluindo as barras de erro correspondentes aos desvios-padrão. É possível notar maior repetibilidade entre os testes, e consequentemente, menores desvios-padrão quando comparado aos dados de desgaste do pino. Porém, os valores de atrito obtidos para cada emulsão ainda são muito próximos, também necessitando de uma análise estatística.

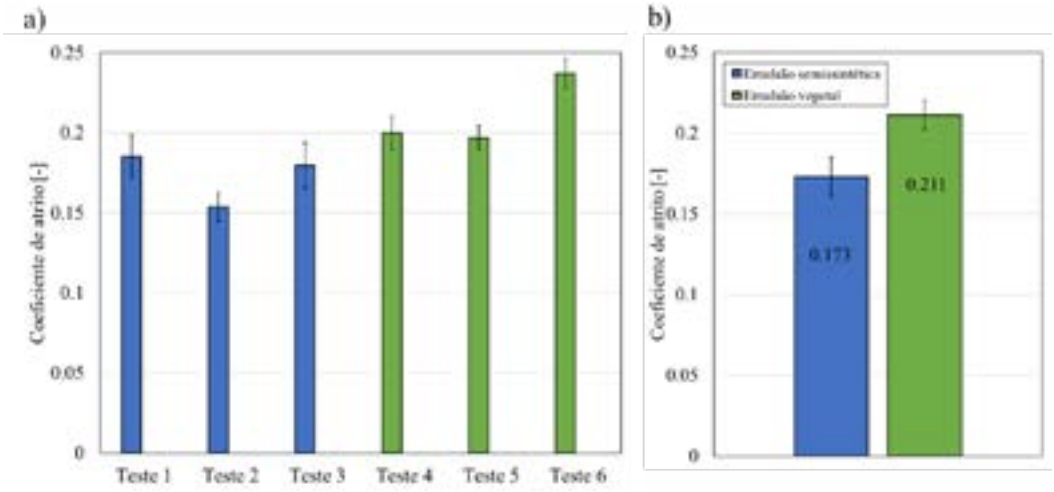


Figura 4. Medidas de atrito obtidas experimentalmente: a) coeficiente de atrito médio de cada teste, e b) coeficiente de atrito médio para cada fluido lubri-refrigerante.

Após a análise estatística, os resultados do Teste Wilcoxon Independente, retornaram p-valores de 0.7 e 0.1, para os dados médios de desgaste dos pinos (diâmetro médio da marca de desgaste e volume de material removido) e dos coeficientes de atrito dos testes, respectivamente. Ambos os p-valores são superiores ao nível de significância de 0.05, indicando a ausência de evidências suficientes para rejeitar a hipótese nula. Assim, não é possível afirmar que há diferença estatística significativa entre a emulsão vegetal e a emulsão semissintética quanto ao desgaste dos pinos e ao coeficiente de atrito para os parâmetros testados. Entretanto, a emulsão vegetal produziu resultados semelhantes à emulsão semissintética, com um menor percentual de óleo base em sua composição, o que pode ser considerado benéfico do ponto de vista econômico e ambiental.

4. CONCLUSÃO

O presente estudo testou tribologicamente duas emulsões (emulsão vegetal e emulsão semissintética) aplicadas em MQL em um tribômetro do tipo-pino-sobre-disco, com foco na análise do desgaste dos pinos e nos coeficientes de atrito resultantes dos ensaios. Os parâmetros de carga, rotação, tempo e vazão dos lubri-refrigerantes foram mantidos constantes ao longo dos testes.

Com base nos resultados dos testes e na análise estatística, é possível concluir que a emulsão vegetal apresentou um desempenho tribológico comparável a uma emulsão semissintética comercial, sem que houvesse a adição de emulsificantes ou aditivos, como os presentes na emulsão semissintética. Além disso, a emulsão vegetal contém apenas 1% de óleo base em sua composição, o que significa que, a partir da mesma quantidade de óleo base, é possível produzir um volume de lubri-refrigerante cinco vezes maior em comparação à emulsão comercial. Essa característica confere à emulsão vegetal não apenas vantagens econômicas, mas também ambientais, uma vez que reduz significativamente o consumo de óleo base e os resíduos gerados, o que fortalece seu potencial como alternativa aos fluidos convencionais de origem petrolífera.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio das agências de pesquisa brasileiras CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior).

REFERÊNCIAS

[1] S. Debnath, M.M. Reddy, Q.S. Yi, Environmental friendly cutting fluids and cooling techniques in machining: A review, J. Clean. Prod. 83 (2014) 33–47. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.07.071.

[2] D. Ozimina, J. Kowalczyk, M. Madej, Ł. Nowakowski, A. Kulczycki, The Impact of the Type of Cutting Fluid on the Turning Process, Tribologia 273 (2018) 119–126. https://doi.org/10.5604/01.3001.0010.6149.

[3] K. Li, F. Aghazadeh, S. Hatipkarasulu, T. Ray, Health Risks From Exposure to Metal-Working Fluids in Machining and Grinding Operations, Int. J. Occup. Saf. Ergon. 9 (2003) 75–95. https://doi.org/10.1080/10803548.2003.11076555.

[4] U.S. Dixit, D.K. Sarma, J. Paulo Davim, Machining with Minimal Cutting Fluid, in: Environ. Friendly Mach., Springer, 2012: pp. 9–24. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-2308-9.

[5] E.O. Aluyor, K.O. Obahiagbon, M. Ori-Jesu, Biodegradation of vegetable oils: A review, Sci. Res. Essay 4 (2009) 543–548. https://doi.org/10.5897/SRE.

[6] H.A. Spikes, Additive-additive and additive-surface interactions in lubrication, Lubr. Sci. 2 (1989) 3–23.

https://doi.org/10.1002/ls.3010020102.
[7] N.R. Dhar, M. Kamruzzaman, M. Ahmed, Effect of minimum quantity lubrication (MQL) on tool wear and surface roughness in turning AISI-4340 steel, J. Mater. Process. Technol. 172 (2006) 299–304. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.09.022.
[8] J. Singh, S.S. Gill, M. Dogra, R. Singh, A review on cutting fluids used in machining processes, Eng. Res. Express 3 (2021). https://doi.org/10.1088/2631-8695/abeca0.
[9] P. Neis, Development of a Multifunctional Tribometer with Independent Temperature Control of the Brake Disk, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Brasil) e Ghent University (Bélgica), 2012.
[10] Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus, (2017). https://doi.org/10.1520/G0099-17.
[11] F. Wilcoxon, Individual Comparisons by Ranking Methods, Biometrics Bull. 1 (1945) 80. https://doi.org/10.2307/3001968.

44º SENAFOR

28ª Conferência Internacional de Forjamento - Brasil
14ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas / 11º Congresso do BrDDRG
14ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis
3ª Conferência Internacional de Inovação em Materiais e Manufatura
Porto Alegre, RS, dias 1, 2 e 3 de outubro de 2025
www.senafor.com

CHARACTERIZATION AND APPLICATION OF BIOSORBENT FROM WHITE GRAPE BAGASSE

Alexandra Piaia [1]
Bethania Brochier [2]

ABSTRACT

The growing concern about environmental problems, especially the contamination of water resources and the increasing generation of waste, makes it necessary to search for low-cost and environmentally friendly alternatives to address this issue. Seeking a solution, this work aimed to produce, characterize, and apply dried white grape bagasse as a biosorbent for the removal of methylene blue from synthetic effluent. The results showed a material with a moisture content of 7.34 ± 0.44%, ash content of 4.26 ± 0.01%, pH of 4.03 ± 0.01, electrical conductivity of 3.22 ± 0.04 mS/cm, and density of 1.434 ± 0.002 g/cm³. The methylene blue removal percentage reached 93.5 ± 3.2%. The Freundlich isotherm provided the best fit to the experimental results, indicating a multilayer adsorption process. Therefore, grape bagasse from white varieties can be considered a promising biosorbent for methylene blue removal.
Key words - Biosorbent, adsorption, white grape bagasse, isotherms.

1. INTRODUCTION

A global concern is the presence of contaminants in drinking water and the increasing generation of waste. This necessitates the search for low-cost, environmentally friendly alternatives. Therefore, in an attempt to create a sustainable alternative for the disposal of white grape skins – a fairly abundant residue from the winemaking process – a biosorbent was developed from grape bagasse. This biosorbent was compared with other biosorbents and activated carbons and applied to remove methylene blue from water samples. The removal efficiency was evaluated by simulating a contamination scenario in a water source. This process employed the adsorption unit operation, which consists of removing compounds from a fluid phase by a solid capable of retaining them on its surface [1].

Methylene blue, the contaminant selected for this study, is a cationic dye widely used in the textile industry for dyeing cotton and wool fabrics, and also applied as a redox indicator, in temporary hair dyes, and in paper dyeing [2]. Because of its properties, such as the ability to react with different substrates, the treatment of effluents containing this dye is often challenging [3]. Among treatment methods, adsorption is widely used for colored effluents because of its low cost and ease of operation [4].

Biosorbents, employed to remove contaminants from the fluid phase, originate from biological sources such as plants, crustaceans, microorganisms, and animals [5], [6]. Biomass is an abundant natural material with adsorption capabilities. Several food industries generate residual biomass, that is, organic waste not used in the process [7]. The adsorption capacity depends on both the chemical and physical characteristics of the adsorbent and the properties of the adsorbate. The use of biosorbents minimizes environmental impact in two ways: by reducing residual biomass, which often becomes

[1] Chemical Engineer; Polytechnic School, Unisinos University, Brazil.
[2] Prof. Dr. Chemical Engineering; Polytechnic School, Unisinos University, Brazil.

a pollutant due to accumulation, and by providing an alternative method for treating effluents containing heavy metals, thus allowing for reuse [7]. Studies have reported the use of biosorbents for the removal of organic and inorganic pollutants, dyes, heavy metals, and for the treatment of wastewater containing pesticides, among others [8].

2. MATERIAL AND METHODS

The biomass used as an adsorbent in this study was white grape bagasse from the *Vitis vinifera* variety. The material was donated by a winery located in Garibaldi, in the Serra Gaúcha region. It was sun-dried for 20 hours, following [9], and then stored in a freezer at low temperatures until the tests were initiated. Subsequently, it was oven-dried at 50 °C for 24 hours, according to [10]. After drying, and following the methodology of [11], the material was ground with a blender until the desired particle size was reached, generating the white grape bagasse biosorbent (BBU).

To characterize the biosorbent, the moisture content, ash content, pH, and electrical conductivity of the BBU were determined according to [12]. The point of zero charge (PZC), an important parameter for estimating the pH at which the substance exhibits zero surface charge, was also determined using the “11-point experiment” method suggested by [13].

Subsequently, the true density was determined using gas pycnometry, which is based on the diffusion of an inert gas into the particles [14], and particle size classification was performed by sieving, with the particle size expressed as Sauter’s mean diameter. The specific surface area was determined using the Brunauer–Emmett–Teller (BET) method, based on nitrogen adsorption, after drying the biosorbent sample at 60 °C for 10 minutes. Additionally, morphological analysis was carried out using Scanning Electron Microscopy (SEM) to examine the biosorbent structure at magnifications of up to 3000×. The analyses were performed using equipment from the Technological Institute of Paleoceanography and Climate Change (itt Oceaneon, Unisinos). The functional groups present in the sample were identified using Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR). The spectra were recorded with 30 scans at a resolution of 4 cm^{-1} over the range of 4000–650 cm^{-1}.

In the adsorption tests, the influence of adsorbent dosage on the process was evaluated. A calibration curve was prepared using an initial solution of 0.01 $g \cdot L^{-1}$, which was diluted to concentrations ranging from 0.0005 to 0.005 $g \cdot L^{-1}$ in 100 mL volumetric flasks. The final concentration of methylene blue in the solutions was determined using a UV–Vis spectrophotometer, with absorbance measured at the maximum wavelength of 670 nm.

To evaluate methylene blue removal, a solution of 0.01 $g \cdot L^{-1}$ was prepared. Adsorption studies were performed as a function of adsorbent dosage (1.0, 0.5, 0.3, 0.1, and 0.05 g) in 50 mL of solution. The experiments were conducted at room temperature (20 ± 2 °C) under constant stirring at 120 rpm for 1 h. The samples were then centrifuged at 2500 rpm for 2 min. An aliquot of the supernatant was transferred to a quartz cuvette, and absorbance was measured using a UV–Vis spectrophotometer at 670 nm. The removal percentage and the amount of dye adsorbed at equilibrium ($mg \cdot g^{-1}$) were calculated using Equations 1 and 2, where Equation 1 refers to the amount adsorbed and Equation 2 to the removal percentage.

$$q_e = \frac{(C_0 - C_f)}{m} . V \quad (1)$$

Where: C_0 e C_f represent the initial and final concentrations of the metal ions ($mg \cdot L^{-1}$),

respectively; *V* is the volume of the solution to be treated (L); and *m* is the mass of biosorbent (g).

$$Remoção\ (\%) = \frac{(C_0 - C_e)}{C_0}.100 \quad (2)$$

Where: C_0 e C_e are the initial and equilibrium methylene blue concentrations ($mg.L^{-1}$), respectively.

In adsorption isotherm tests, the procedure can be carried out in two ways: by adding a fixed mass of adsorbent to a fixed volume while varying the solute concentration, or by varying the adsorbent dosage for a fixed solute concentration [15]. The experiments in this study were performed using the second approach. Aliquots of 50 mL of solution were prepared in 250 mL Erlenmeyer flasks, and the corresponding amount of biosorbent was added to each flask. The flasks were then placed on a shaking table at 120 rpm for 1 h. Immediately afterward, the samples were transferred to Falcon tubes and centrifuged at 2500 rpm for 2 min. The supernatant was analyzed using a UV–Vis spectrophotometer at a wavelength of 670 nm.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Characterization tests

The characterization results obtained are shown in Table 1. which are commented on below.

Table 1: Characterization of white grape bagasse biomass biosorbent.

Parameter	Value
Moisture on wet basis (%)	7.34 ± 0.44
Ash on wet basis (%)	4.26 ± 0.01
pH	4.03 ± 0.01
Electrical conductivity(mS/cm)	3.22 ± 0.04
Point of zero charge	5.05 ± 0.10
Sauter mean diameter (mm)	0.34 ± 0.01
Mass density (g/cm³)	1.434 ± 0.002
Specific surface area BET (m²/g)	0.3687 ± 0.0147

The moisture content of the BBU was found to be similar to the results reported by [16], in which the moisture contents of residues from different grape varieties ranged from 4.57 to 8.97%. Although there is no legislation establishing a specific moisture value for grape residues, commercial activated carbon, as cited by [17], specifies a maximum moisture content of 10%. Therefore, the BBU obtained in this study exhibited satisfactory moisture content according to the technical specification for activated carbon when used for adsorption.

The ash content of a sample represents the amount of inorganic matter relative to the total mass of the analyzed sample. According to the ABNT NBR 11834:1991 standard, powdered activated carbons must have an ash content of no more than 8%. Although the BBU obtained in this study cannot be classified as powdered carbon, its ash content was below the limit required by the standard.

The pH of the grape bagasse (4.03 ± 0.01) indicates an acidic character, similar to that of the grape itself. This value is comparable to the pH of 3.51 ± 0.02 reported for grape skin flour by [18] and 3.50 reported by [19] for grape bagasse flour, both classifying

the material as highly acidic.

According to [17], high electrical conductivity can reduce adsorption efficiency, limiting the application of the adsorbent because the minerals present in the sample may compete with the target compound for adsorption. [17] also reported a wide range of electrical conductivity values for activated carbons, both commercial and obtained from waste, ranging from 4.7 to 895 µS/cm. The value observed for BBU (3.22 ± 0.04 mS/cm) is considerably higher than those reported in the references, which may indicate a potential challenge for the sample to adsorb the contaminant as efficiently as expected.

According to [20], when the point of zero charge (PZC) is lower than the solution pH, the surface of an adsorbent will be negatively charged, whereas when it is higher than the solution pH, the surface tends to be positively charged. Considering that methylene blue is a cationic dye, it can be assumed that the adsorbent will be negatively charged, since the solution pH is likely higher than the biosorbent's surface pH, thereby enhancing its effectiveness in removing cationic species.

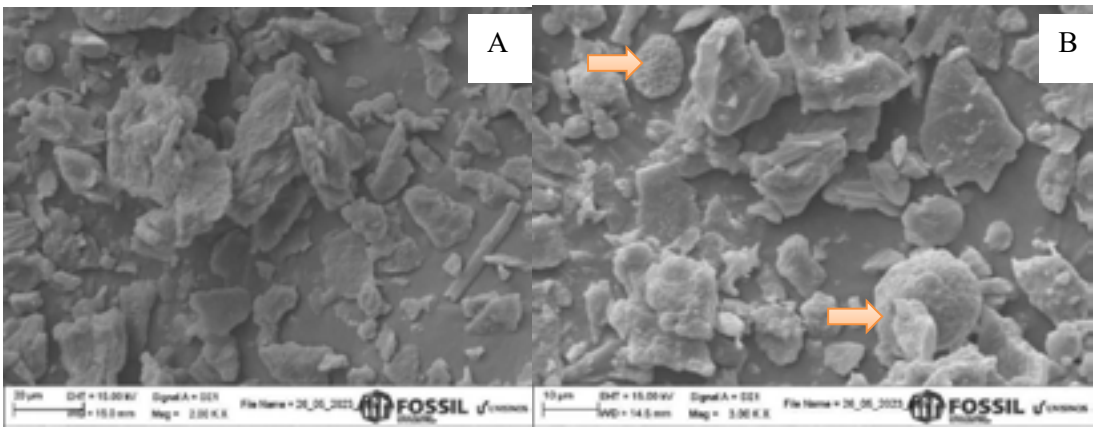
The true density of the biosorbent was determined using gas pycnometry and found to be 1.434 ± 0.002 $g \cdot cm^{-3}$. For comparison, [21] reported a value of 1.14 $g \cdot cm^{-3}$ for pecan nut shells, while [17] reported 0.44 $g \cdot cm^{-3}$ for commercial coal. The BBU density is therefore close to that of the other biomass residue mentioned.

The specific surface area of the biosorbent was determined by the BET method, yielding a value of 0.37 ± 0.01 m^2/g. The low surface area can be attributed to the non-activation of the material.

According to [17], activated carbons can be classified into two groups based on particle size: pulverized (for liquids) and granular (for gases and vapors). Pulverized activated carbons have particle sizes ranging from 1 to 150 µm, while granular carbons range from 0.5 to 4 mm. Considering these ranges, the average Sauter diameter of the analyzed biosorbent does not fall into either category; however, it tends toward larger dimensions, characteristic of granular activated carbons, indicating potential for adsorption of gases and vapors.

Figure 1 presents the SEM images of the biosorbent. Figure 1A illustrates the irregular nature of the material, exhibiting a granular and flake-like appearance. Additionally, Figure 1B shows a rough surface with porosity (highlighted by arrows), attributed to grape seeds. Overall, particles with highly heterogeneous shapes and sizes are evident, likely resulting from the use of different grape varieties in the biosorbent composition, which may have distinct physical and chemical characteristics.

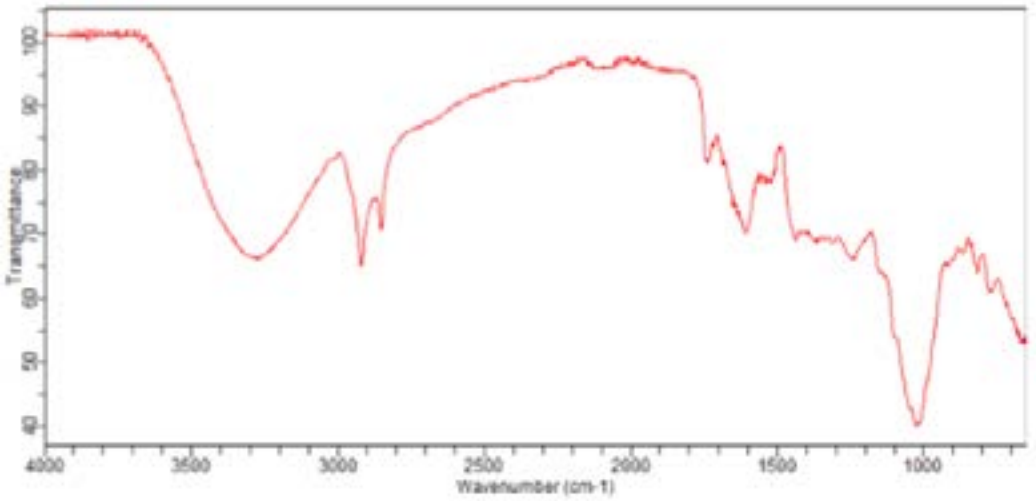
Figure 1: SEM images of white grape bagasse biosorbent



Legend: A) 2000 × magnification; B) 3000 × magnification.

The analysis of functional groups generated the spectrum shown in Figure 2.

Figure 2: FTIR spectrum of grape bagasse biosorbent



The first band in the absorption spectrum, observed above 3000 cm^{-1}, can be attributed to the stretching of O–H groups related to adsorbed water molecules or the moisture present in the sample. The peaks between 2800 and 3000 cm^{-1} are associated with C–H stretching of CH_2 and CH_3 groups. The band between 1700 and 1600 cm^{-1} corresponds to C=O bonds present in carbonyl groups such as aldehydes and ketones, which, according to [20], are part of the lignin structure. The band near 1000 cm^{-1}, also reported by [20], is associated with the asymmetric C–O–C stretching of cellulose and hemicellulose, potentially confirming the presence of lignin. Literature studies indicate that cellulose, hemicellulose, and lignin exhibit different chemical properties, with lignin showing a particular ability to adsorb organic substances – feature crucial for the performance of BBU as a contaminant adsorbent in this study.

3.2. Adsorption tests

After determining the calibration curve with a 0.01 $g \cdot L^{-1}$ methylene blue solution, adsorption tests were carried out. The final dye concentration in each tested sample was measured, and the removal percentage was calculated for each biosorbent dosage. The results are presented in Table 2.

Table 2: Methylene blue adsorption tests with initial concentration of 0,01 $g.L^{-1}$

Sample	Biosorbent mass (g)	Final concentration ($mg.L^{-1}$)	Removal percentage (%)
1	1	0.65 ± 0.32	93.5 ± 3.2
2	0.5	0.74 ± 0.38	92.6 ± 3.8
3	0.3	0.83 ± 0.37	91.7 ± 3.7
4	0.1	0.91 ± 0.33	90.9 ± 3.3
5	0.05	1.00 ± 0.35	90.0 ± 3.5

It can be observed that as the biosorbent mass increases, the final dye concentration in the solution tends to decrease, resulting in a higher removal percentage. It is important to note that all samples were in contact with the biosorbent for the same

duration; therefore, contact time did not influence the removal percentage in this experiment. According to the Tukey test, no significant differences were observed in the removal percentage among the different biosorbent dosages ($p > 0.05$), possibly due to variability between replicates. However, visual differences in solution color were noticeable. The variations in removal efficiency may be attributed to particle agglomeration, which, according to [22], reduces the effective contact surface between the solid and the adsorbate.

The study also aimed to determine which adsorption isotherm – Langmuir or Freundlich – best describes the adsorption of methylene blue onto BBU. To this end, isotherms were constructed to evaluate the most favorable adsorption behavior, parameters are shown in Table 3.

Table 3: Parameters of Langmuir and Freundlich isotherms

Langmuir		**Freudlich**	
K_L (L.mg^{-1})	- 0.9951	(K_F (mg.g^{-1})(L.mg^{-1})$^{1/n}$)	7.061
q_e (mg.g)	- 0.2713	n	0.1456
R^2	0.9303	R^2	0.9318
REMQ	9.842	REMQ	0.353
χ^2	807.170	χ^2	1.040

A better fit of the experimental data was observed with the Freundlich model, which was confirmed using statistical error metrics (χ^2 and REMQ), as lower values indicate a better model fit. Therefore, the adsorption of methylene blue onto the pore surface of the white grape bagasse biosorbent can be characterized as multilayered, without surface saturation, involving adsorption sites with different energies and the influence of neighboring active sites, which may allow more than one molecule to be adsorbed per site. According to [23], for strongly favorable solid–liquid adsorption isotherms, the Freundlich equation generally provides a good fit to experimental data. Furthermore, [24] stated that for adsorption to be favorable, the Freundlich parameter nnn must be within the range of 0 to 1, which is corroborated by the value of n = 0.1456 obtained in this study.

4. CONCLUSION

Based on the results obtained in this study, it can be concluded that grape bagasse can be used to produce biosorbents effective in removing methylene blue, consistent with observations in other studies. A dye removal percentage of 93.5 ± 3.2% from the synthetic medium was achieved, demonstrating the efficiency of the biosorbent and its potential as an alternative to commercial activated carbons.

Material characterization, the main objective of this study, was performed through the evaluation of several parameters, including pH, electrical conductivity, particle size, ash content, moisture content, specific gravity, BET surface area, SEM, and FTIR analysis. The moisture and ash content values obtained for BBU are within the limits typically used to characterize powdered activated carbons, common adsorbents for contaminant removal, although BBU itself cannot be classified as powdered carbon. The biosorbent exhibited an acidic character, and its point of zero charge was 5.05 ± 0.10.

Considering the cationic nature of methylene blue, the biosorbent is expected to be more effective at higher pH values.

The Freundlich model provided the best fit to the experimental data, indicating that the adsorption process can be characterized as multilayered, without surface saturation, involving adsorption sites with different energies and the influence of neighboring active sites, allowing more than one molecule to be adsorbed per site. These results demonstrate the effectiveness of white grape bagasse for biosorbent production and highlight the importance of utilizing this agroindustrial residue. Further optimization could improve the biosorbent properties, and additional studies on the removal of other substances could broaden its range of applications.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank UNISINOS for providing the infrastructure and support necessary for conducting the experiments.

REFERENCES

[1] COELHO, Felipe Lange. Processos de absorção e adsorção. In SILVA, Nivea de Lima da et al. Operações unitárias de transferência de calor e massa. Porto Alegre: SAGAH, 2021. p. 145-159.

[2] SILVA, W. L. L.; OLIVEIRA , S. P. Modificação das características de adsorção do bagaço de cana para remoção de azul de metileno de soluções aquosas. SCIENTIA PLENA, [S. l.], v. 8, n. 9, 2012.

[3] ALFREDO, Ana Priscila Cristine. ADSORÇÃO DE AZUL DE METILENO EM CASCA DE BATATA UTILIZANDO SISTEMA EM BATELADA E COLUNA DE LEITO FIXO. 2016. Trabalho de conclusão de curso (Curso Superior de Tecnologia em Processos Químicos) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR Câmpus Toledo, TOLEDO, 2016. Disponível em: http://riut.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/15889/2/TD_COPEQ_2013_1_04.pdf.

[4] HONORATO, A. C., Machado, J. M., Celante, G., Borges, W. G. P., Dragunski, D. C., & Caetano, J. (2015). Biossorção de azul de metileno utilizando resíduos agroindustriais. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 19(7), 705 710. doi:10.1590/1807-1929/agriambi.v19n7p705-710

[5] CARDOSO, Natali Farias. Adsorção de corantes têxteis utilizando biossorventes alternativos. 2012. Tese (Doutorado em Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

[6] VAGHETTI, Júlio César Pacheco. Utilização de biossorventes para remediação de efluentes aquosos contaminados com íons metálicos. 2009. Tese (Doutorado em Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

[7] BONIOLO, Milena Rodrigues; YAMAURA, Mitiko. “Biossorvente: uma opção alternativa para o tratamento de resíduo radioativo”. São Paulo: IPEN, 2006.

[8] TEMESGEN, Fikiru; GABBIYE, Nigus; SAHU, Omprakash. Biosorption of reactive red dye (RRD) on activated surface of banana and orange peels : Economical alternative for textile effluent. Surfaces and Interfaces, v. 12, p. 151–159, 2018. Disponível em: < https://doi.org/10.1016/j.surfin.2018.04.007>.

[9] MARTINS, Wanessa Alves et al. “Reaproveitamento de resíduos agroindustriais de casca banana para tratamento de efluentes”. Pombal - PB: Revista Verde, v.10, n.1, p.96-102, 2015.

[10] RODRIGUES, L.V.S. Avaliação do potencial biossorvente da biomassa de cascas de abacaxi para remoção de agroquímicos em matrizes aquosas. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Química) – Instituto Federal Goiano – Campos Ceres, Ceres – GO, 2019. Disponível em: < https://repositorio.ifgoiano.edu.br/bitstream/prefix/755/1/tcc_Lanna%20Rodrigues.pdf >

[11] TAKESHITA, V.et al. Adsorption isotherms of diuron and hexazinone in drinking water using four agro-industrial residues, 2020. Planta Daninha, v.38. Disponível em: ISSN 1806-9681 (online)

[12] INSTITUTO ADOLFO LUTZ. “Métodos físico-químicos para análise de alimentos”. Instituto Adolfo Lutz: 4. ed., São Paulo, 2008.

[13] DEOLIN, M.H.S; FAGNANI, H.M.C.; ARROYO, P.A.; BARROS, M.A.S.D. Obtenção do ponto de carga zero de materiais adsorvente. 2013. VIII EPCC – Encontro Internacional de Produção Científica Cesumar. CESUMAR, Maringá – PR, 2013. ISBN 978-85-8084-603-4. Disponível em: < http://www.cesumar.br/prppge/pesquisa/epcc2013/oit_mostra/Mara_Helen_da%20Sil va_Deolin.pdf>.

[14] CREMASCO, Marco Aurélio. Operações unitárias em sistemas particulados e fluidomecânicos. 3 ed. São Paulo: Blucher, 2018.

[15] NASCIMENTO, Ronaldo Ferreira; LIMA, Ari Clecius Alves de; VIDAL, Carla Bastos; MELO, Diego de Quadros; RAULINO, Giselle Santiago Cabral. Adsorção: aspectos teóricos e aplicações ambientais. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2014. ISBN: 978-85-7485-186-0 (Estudos da Pós - Graduação)

[16] SILVA, Gabriela Viana da. CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DE CASCAS DE UVAS HÍBRIDAS DESIDRATADAS OBTIDAS POR DIFERENTES MÉTODOS. Mestrado em Ciência de Alimentos – Universidade Federal da Bahia, 2017.

[17] SILVA, Janice da. ESTUDO DA EFICIÊNCIA E APLICABILIDADE DE CARVÃO ATIVADO RESULTANTE DE PIRÓLISE DE CASCA DE ARROZ EM BARREIRAS REATIVAS NA REMOÇÃO DE CONTAMINANTES EM SOLOS. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS, 2009.

[18] BENDER, A. B. B., LUVIELMO, M. DE M., LOUREIRO, B. B., SPERONI, C. S., BOLIGON, A. A., SILVA, L. P. DA, & PENNA, N. G. (2016). Obtenção e caracterização de farinha de casca de uva e sua utilização em snack extrusado. Brazilian Journal of Food Technology, 19(0). doi:10.1590/1981-6723.1016

[19] FERREIRA, L. F. D. Obtenção e caracterização de farinha de bagaço de uva e sua utilização em cereais matinais expandidos. 2010. 135 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Alimentos)- Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.

[20] BEZERRA. W.F.P. et al. Biomassa de cana-de-açúcar modificada quimicamente para remoção de glifosato em meio aquoso. Tese (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita filho - UNESP, Presidente prudente - SP, 2019.

[21] ALDANA, Hugo; LOZANO, Francisco J.; ACEVEDO, Joaquín; MENDOZA, Alberto. Thermogravimetric characterization and gasification of pecan nut shells. Bioresource Technology, vol. 198, https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.09.069. p. 634–641, 1 Dec. 2015.

[22] DIEL, J.; CRISTINA DIEL, J.; DA CRUZ SEVERO, E.; PEDROSO DRUZIAN, S.; DOS SANTOS NUNES, I. AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DE REMOÇÃO DE AZUL DE METILENO UTILIZANDO COMO ADSORVENTE BAGAÇO DE UVA. Anais do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão, v. 10, n. 2, 3 mar. 2020.

[23] FRANCO, Marcela Andrea Espina de. Adsorção de fármacos em carvão ativado: processo em batelada, leito fixo e modelagem das curvas de ruptura. 2018. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

[24] STOPPE, Ana Carolina Ribeiro; FALAD, Jessica Carvalho; CUNHA, Luiza Machado Provasi; NETO, José Luiz Vieira; SANTOS, Kássia Graciele dos. REMOÇÃO DO CORANTE AZUL DE METILENO NO TRATAMENTO DE EFLUENTES POR ADSORÇÃO EM CARVÃO DE COCO VERDE E CARVÃO ATIVADO . In: ANAIS DO XXXIX CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS, 2019, Belém. Campinas, Galoá, 2019. Disponível .

44º SENAFOR
28ª Conferência Internacional de Forjamento - Brasil
14ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas / 11º Congresso do BrDDRG
14ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis
3ª Conferência Internacional de Inovação em Materiais e Manufatura
Centro de Eventos do Hotel Plaza São Rafael
Porto Alegre/RS 1, 2 e 3 de outubro de 2025 **/ October 1-3, 2025**

Compostos voláteis produzidos durante a fermentação espontânea e controlada do cacau Criollo

Diner Mori Mestanza [1,2]
Vanessa Barbieri Xavier [2]
Victor Hugo Silva Rodrigues [2]
Rubem Mário Figueiró Vargas [2]
Eduardo Cassel [2]

RESUMO

A qualidade sensorial do cacau Criollo Fino de Aroma está diretamente ligada à formação de compostos voláteis durante a fermentação. Este estudo avaliou a fermentação espontânea e a controlada com *Saccharomyces cerevisiae* em grãos da região Amazonas (Peru), identificando por CG-EM/HS-SPME, álcoois, ésteres, aldeídos, cetonas e terpenos. Na fermentação controlada, destacaram-se ésteres associados a aromas frutados e florais, enquanto aldeídos e terpenos contribuíram com notas características em estágios específicos. A inoculação com *S. cerevisiae* favoreceu maior diversidade e complexidade aromática em menor tempo, configurando uma alternativa tecnológica para padronizar a qualidade do cacau fermentado e ampliar suas aplicações na formação de novas fragrâncias e materiais similares.

Palavras-chave: Cacau Criollo; compostos voláteis; fermentação controlada; *Saccharomyces cerevisiae*; aromas.

ABSTRACT

The sensory quality of Criollo Fine Aroma cocoa is directly linked to the formation of volatile compounds during fermentation. This study evaluated spontaneous fermentation and controlled fermentation with *Saccharomyces cerevisiae* in beans from the Amazonas region (Peru), identifying, by GC-MS/HS-SPME, alcohols, esters, aldehydes, ketones, and terpenes. In the controlled fermentation, esters associated with fruity and floral notes predominated, while aldehydes and terpenes contributed characteristic aromas at specific stages. Inoculation with *S. cerevisiae* promoted greater diversity and aromatic complexity in less time, representing a technological alternative to standardize cocoa quality and expand its applications.

Keywords: Criollo cocoa; volatile compounds; controlled fermentation; *Saccharomyces cerevisiae*; aromas.

[1]Escola de Pós-Graduação, Programa de Doutorado em Ciências para o Desenvolvimento Sustentável, Faculdade de Engenharia Zootecnista, Biotecnologia, Agronegócios e Ciência de Dados, Universidade Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas, Chachapoyas, Chachapoyas 01001, Peru.
[2] Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul; Brasil

1. INTRODUÇÃO

O cacau (*Theobroma cacao* L.) é a matéria-prima essencial para a fabricação de chocolate [1]. Sua qualidade sensorial depende em grande parte do perfil de compostos bioativos e aromáticos presentes no produto final [3]. Esses compostos, considerados marcadores-chave de qualidade, incluem pirazinas, aminas, amidas, ácidos carboxílicos, ésteres e hidrocarbonetos e são gerados, principalmente, durante as etapas pós-colheita, relevantes no processo de fermentação [4].

Vários estudos demonstraram que o tipo e a concentração de compostos voláteis variam de acordo com a origem e a variedade do cacau [5]. Nos cacaus Criollos do México, os grupos químicos predominantes foram ésteres (25 compostos), aldeídos (21), álcoois (19), cetonas (15) e ácidos (9). Em menor quantidade pirazinas (6), furanos (4), hidrocarbonetos (4), incluindo nitrila (1), piridina (1) e pirrol.. Dentre todos eles, os aldeídos se destacaram por apresentar as maiores áreas de pico (70–90%), tanto no início quanto no final do processo de fermentação [6].

A fermentação do grão de cacau é crucial para o desenvolvimento de moléculas precursoras do aroma e sabor do cacau [6], etapa onde ocorrem reações bioquímicas, enzimáticas e microbiológicas. Isso permite o desenvolvimento de frações voláteis essenciais, álcoois e ésteres, e a geração de precursores de sabor e aroma, como peptídeos livres e açúcares redutores [7]. A aplicação de culturas iniciadoras, como a combinação de *Hanseniaspora opuntiae* e *Kluyveromyces marxianus*, tem se mostrado eficaz no aumento da formação de ésteres aromáticos e na redução de compostos indesejáveis, como o ácido acético, melhorando assim a qualidade do grão fermentado [8].

Dentre os compostos voláteis, vários foram identificados como marcadores-chave de aroma [9], incluindo: 3-metilbutanal, 2-heptanol, acetato de 2-feniletila, álcool 2-fenetil, ácido isovalérico, ácido acético, benzenoacetaldeído e 2,3,5-trimetilpirazina. Da mesma forma, compostos considerados marcadores tecnológicos são reconhecidos, como: metilpirazina, acetoína, furfural, 2,3-dimetilpirazina, 2,5-dimetilpirazina, 2,6-dimetilpirazina e tetrametilpirazina [6].

Apesar de sua importância comercial e sensorial, estudos sobre a dinâmica de compostos voláteis em variedades de cacau nativas do Peru, particularmente do tipo Criollo, são escassos. Faltam informações detalhadas sobre as alterações sofridas por esses compostos durante as fases de fermentação, secagem e torrefação, o que limita o desenvolvimento de estratégias para melhorar a qualidade e a padronização do produto final. Compreender essa dinâmica é essencial para estabelecer critérios objetivos de avaliação, criar chocolates com perfis sensoriais definidos e aumentar o valor comercial do cacau.

O objetivo desta pesquisa foi identificar e caracterizar os compostos voláteis (álcoois, aldeídos, cetonas, ésteres, ácidos carboxílicos e pirazinas) gerados durante o processo de fermentação dos grãos de cacau Criollo, utilizando a análise de componentes principais (PCA). Essa abordagem busca contribuir para a compreensão do desenvolvimento das notas de sabor do chocolate, essencial para a produção de chocolates de alta qualidade.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Materiais

Para cada experimento de fermentação foram utilizados 40 kg de cacau Criollo fresco. As amostras de cacau Criollo de aroma fino foram coletadas em Chiriaco-Imaza, na região amazônica do Peru. A fermentação ocorreu na Cooperativa Agrícola APROCAM em Bagua, Amazonas, Peru.

2.2. Métodos

2.2.1 Fermentação

A fermentação foi realizada em caixas de madeira revestidas com aço inoxidável (50 × 50 × 50 cm), utilizando *Saccharomyces cerevisiae* para fermentação controlada e, como controle, fermentação espontânea em paralelo. O processo de ativação de *S. cerevisiae* (derivado de ATCC ® 18824 TM, Saint Cloud, MN, EUA) foi realizado de acordo com o método descrito por Chagas et al. [10]. Foram utilizados dois tipos de fermentação, espontânea (SF) e controlada (SC) com *S. cerevisiae*, seguindo o procedimento descrito por Calva-Estrada et al. [13].

2.2.2. Processo de liofilização e moagem do cacau

As amostras de cacau fermentado, colocadas em tubos Falcon de 50 mL, foram ultracongeladas a -79 °C por 48 h e posteriormente liofilizadas (Labconco, modelo 710402010, Kansas City, MO, EUA) na pressão de 0,008 bar e na temperatura de -84 °C por 72 h. O material obtido foi então moído em um almofariz até a formação de um pó homogêneo e acondicionado em tubos Falcon recobertos por papel alumínio para proteção da luz [12].

2.2.3. Processo de microextração em fase sólida e análise de compostos voláteis por GC-MS

As amostras de cacau foram moídas em um almofariz de laboratório, pesadas 2 g e colocadas em um frasco de vidro de 20 mL e hermeticamente fechado com uma tampa de politetrafluoretileno (PTFE). Compostos voláteis de amostras de cacau foram extraídos e analisados por cromatografia gasosa com espectrometria de massas (GC-MS), conforme descrito anteriormente na literatura [13]. Foi utilizado um amostrador multipropósito (Gerstel, Mulheim an der Rur, Alemanha) equipado com uma unidade HS-SPME. A extração de compostos voláteis foi realizada por microextração em fase sólida em headspace (HS-SPME), usando uma fibra de divinilbenzeno/carboxeno/polidimetilsiloxano (DVB/CAR/PDMS) de 50/30 µm (Supelco, Sigma – Aldrich NV, Bornem, Bélgica). A amostra permaneceu por 15 min e 60 °C até atingir a condição de equilíbrio. A fibra foi então exposta no frasco de vidro, mantendo-se a temperatura a 60 °C por 30 min. Os voláteis foram então analisados por GC-MS (Agilent GC System modelo 7890A, acoplado ao espectrômetro de massas quadrupolo MSD 5975C), equipado com uma coluna capilar HP-5MS (Hewlett Packard-Agilent, 5% fenil-95% dimetilpolissiloxano, 30 µm × 250 µm × 0,25 µm). A temperatura inicial do forno foi ajustada em 50 °C por 5 min com um gradiente de 4 °C/min até 250 °C. O gás de arraste foi hélio, com uma vazão de 1,1 mL/min. A fonte de ionização e o detector quadrupolo foram mantidos a 280 e 150 °C, respectivamente. O injetor foi usado no modo splitless e mantido a 250 °C. Nessas condições, a fibra de SPME foi introduzida no injetor do cromatógrafo, com um tempo de dessorção de 5 min. O processo total durou 55 min. Dois critérios de comparação foram utilizados para identificar compostos orgânicos voláteis (COVs): os espectros de massa dos COVs de cada amostra com a biblioteca NIST 2017 (National Institute of Standards and Technology) e os índices de retenção calculados a partir dos COVs de cada amostra, após a injeção do padrão n-alcano (C8-C20) nas mesmas condições analíticas, com o índice de retenção encontrado na literatura.

2.2.4. Análise de dados

De posse da composição dos extratos voláteis, calculados a partir da área dos picos cromatográficos, submeteu-se estea à análise de componentes principais (ACP). Todas as análises estatísticas foram realizadas utilizando o RMarkdown (RStudio, versão 2022.07.2576, Boston, MA, EUA).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Durante a fermentação controlada dos grãos de cacau, um total de 26 compostos orgânicos voláteis (COVs) foram identificados por análise cromatográfica. Esses compostos foram classificados em seis grupos químicos principais (Tabela 1): álcoois, aldeídos, cetonas, ésteres, terpenos e outros compostos. A cinética do aparecimento desses metabólitos voláteis foi avaliada em intervalos de 24 h, de 0 a 144 h de fermentação, permitindo o estabelecimento de padrões temporais em sua formação, transformação e persistência.

3.1. Perfil geral de compostos orgânicos voláteis presentesdurante a fermentação do cacau Criollo de Amazonas, Peru.

Durante a fermentação controlada com *S. cerevisiae* em grãos de cacau Criollo de Chiriaco-Imaza, observa-se uma sucessão marcante de compostos voláteis aromáticos (Figura 1). Nas primeiras 24 h, predominam álcoois como 2,3-butanodiol, 2-heptanol e álcool feniletílico, juntamente com aldeídos (benzaldeído, benzenoacetaldeído), conferindo notas florais, amendoadas e verdes; esse comportamento coincide com estudos que relatam a presença proeminente desses álcoois durante os estágios iniciais da fermentação com leveduras como S. cerevisiae, indicadas como desejáveis para a qualidade do cacau de aroma fino [2]. Entre 48 e 96 h registra-se um aumento em ésteres como acetato de 2-feniletila, acetato de etila, acetato de 1-butanol-3-metila e butanoato de etila, associados a atributos frutados e florais; esses metabólitos também foram identificados como intensificadores de aroma em fermentações iniciadas por cultura [14]. Em estágios finais (120-144 h), o perfil é dominado por 2,3-

butanodiol, acompanhado por quantidades menores de álcoois superiores e ácidos carboxílicos, contribuindo com notas cremosas, frutadas e amanteigadas. Um efeito aromático também foi registrado em fermentações espontâneas, onde este composto está associado a sabores doces e florais [15]. Essa dinâmica corrobora a vantagem da fermentação controlada com *S. cerevisiae*, que promove a síntese controlada de voláteis essenciais para perfis sensoriais complexos e destaca a importância do controle temporal do processo para otimizar a qualidade aromática do cacau de aroma fino.

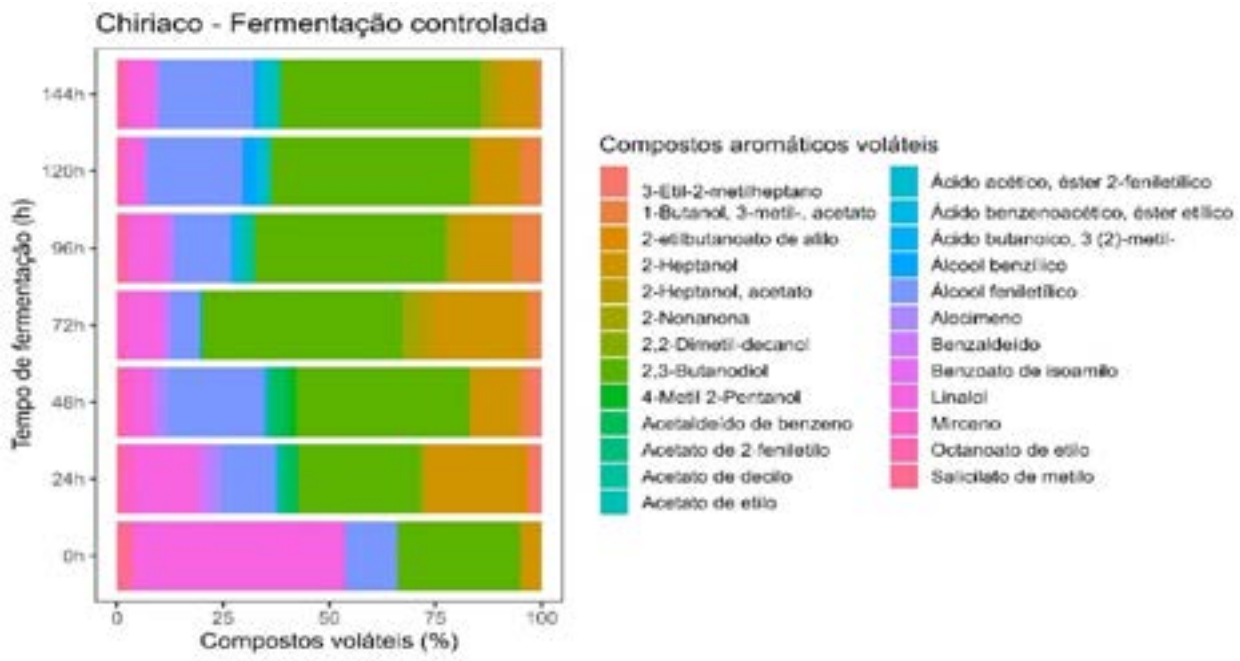


Figura 1. Dinâmica de compostos aromáticos voláteis durante fermentação controlada com *S. cerevisiae* em grãos de cacau Criollo de Chiriaco-Imaza, Bagua, Amazonas, Peru.

A fermentação espontânea de grãos de cacau Criollo Chiriaco-Imaza apresentou um perfil volátil mais heterogêneo e variável em comparação à fermentação controlada (Figura 2). Nas primeiras horas (0–24 h) álcoois como feniletanol, linalol e salicilato de metila foram observados, juntamente com aldeídos (benzaldeído, benzenoacetaldeído) que conferem notas florais e verdes, em concordância com relatos anteriores sobre o acúmulo de álcoois superiores e aldeídos durante a fase inicial de fermentações não controladas [15]. Entre 48 e 96 h, o perfil se diversificou com a presença de 1-butanol-3-acetato de metila e 2-heptanol acetato, além de compostos terpênicos como β-trans-ocimeno e alilcimenos, que contribuem com notas frutadas e herbais. Essas moléculas são características de fermentações espontâneas devido à ação conjunta de leveduras, bactérias lácticas e acéticas [16]. Nas fases finais (120–144 h), evidencia-se a predominância do 2,3-butanodiol, acompanhado de ésteres como o acetato de 2-feniletila e o acetato de benzenoacético, responsáveis pelas notas cremosas, florais e frutadas, o que coincide com estudos que destacam a contribuição de metabólitos tardios para a complexidade aromática do cacau fermentado espontaneamente [15]. Em conjunto, esses resultados demonstram que a fermentação espontânea promove maior diversidade de compostos voláteis, embora com menor consistência entre as repetições, o que pode impactar na homogeneidade do perfil sensorial final, em contraste com os processos controlados com *S. cerevisiae*.

Na Figura 3 são apresentados os resultados estatísticos obtidos pela técnica PCA para o processo de fermentação controlada. Observa-se uma nítida separação temporal na dinâmica dos compostos voláteis durante a fermentação do cacau. Nas primeiras horas (0-24 h), metabólitos como feniletanol, acetato de 2-feniletila e aldeídos estão associados, associados a notas florais e doces. De 48 a 96 h, emergem compostos frutados e herbais, como alil-2-etilbutanoato, β-mirceno e alocimeno, enquanto nos estágios finais (120 a 144 h), metabólitos como 2,3-butanodiol e acetato de etila são concentrados. Esse padrão reflete a sucessão metabólica de leveduras e bactérias, que determina a complexidade aromática final do cacau fermentado.

Tabela 1. Compostos voláteis identificados em grãos de cacau Criollo durante fermentação controlada com *S. cerevisiae*, de Chiriaco – Imaza, Amazonas, Peru.

Nome dos COVs	RT (Min)	RIc	RI - NIST 2017	Tempo de fermentação (h)	Descrição do aroma*
Álcoois					
2,3-Butanodiol	4,659	-	743	0, 24,48, 72, 96, 120, 144	Doce, floral, semelhante à manteiga de cacau, frutado, cremoso, amanteigado
4-Metil 2-Pentanol	5,307	-	770	48	
2-Heptanol	8,352	863	879	0, 24, 48, 72, 96, 120, 144	Cítrico, terra, frito, cogumelo, óleo
Álcool benzílico	13,761	1042	1036	120, 144	Balsâmico fenólico floral de rosas
Álcool feniletílico	16,883	1098	1136	0, 24, 48, 72, 96, 120, 144	Fruta, mel, lilás, rosa, especiarias, floral, doce
2,2-Dimetil-decanol	20,602	1169	1372	24, 48, 72, 96, 120	
Aldeídos					
Benzenoacetaldeído	14,156	1049	1081	24, 48	Baga, gerânio, mel, noz, picante, amêndoa, cereja, morango
Benzaldeído	17,172	1103	1578	24, 48, 72, 96,120, 144	Doce, cereja, amêndoas agradáveis
Cetonas					
2-Nonanona	16,104	1084	1052	72, 144	Frutado, fresco, doce, ceroso, herbáceo verde, semelhante ao coco
Ésteres					
1-Butanol, 3-metil-, acetato	7,542	839	820	48, 72, 96, 120, 144	Banana, frutado
Acetato de etila	10,786	966	893	96, 120, 144	Frutado
Acetato de 2-heptanol	14,16	1049	1019	72, 96, 120, 144	Frutado
Salicilato de metilo	19,938	1156	1281	0, 24, 48, 96, 120, 144	Caramelo e hortelã-pimenta
Octanoato de etila	20,093	1159	1183	72, 96, 120, 144	Doce, mofado, abacaxi e frutado
2-etilbutanoato de alila	20,916	1175	1009	24, 48, 72	
Ácido benzenoacético, éster etílico	21,774	1191	1259	24, 48,72, 96, 120, 144	Frutado, doce
Ácido acético, éster 2-feniletil	22,195	1199	1259	24, 48, 72, 96, 120, 144	Flor, mel, rosa
Benzoato de isoamila	26,824	1295	1394	24, 48,72, 96, 120, 144	
Terpenos					
Mirceno	12,065	1012	958	24, 48, 72, 144	Balsâmico, fruta, gerânio, erva, mosto, cítrico, especiaria
Linalool	16,403	1089	1082	0, 24, 48, 72, 96, 120, 144	Coentro, floral, lavanda, limão, rosa, mentolado, canela, cítrico
Aloocimeno	17,508	1110	993	24, 48, 72,	Agentes aromatizantes
Outros					
3-Etil-2-metilheptano	17,06	1101	887	24, 48	
Ácido butanóico, 3(2)-metil-	20,914	1175	2354	24, 48, 96, 120, 144	

*Segundo NIST Chemistry WebBook, SRD 69: http://webbook.nist.gov/chemistry/name-ser.html

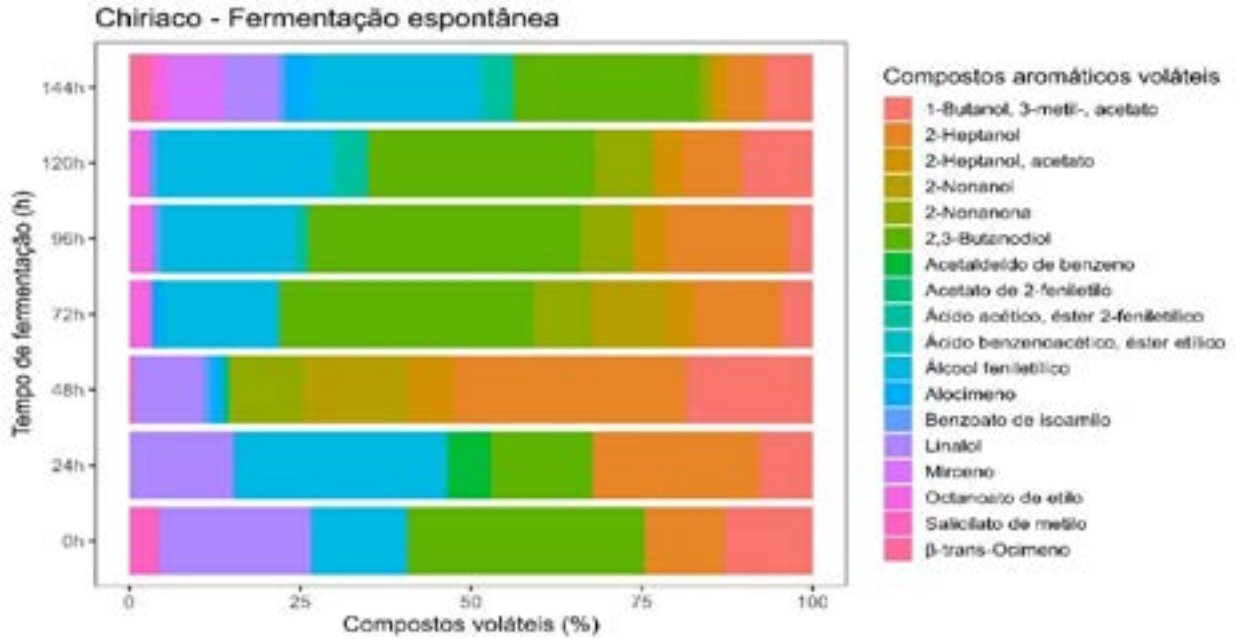


Figura 2. Dinâmica de compostos aromáticos voláteis durante a fermentação espontânea de grãos de cacau Criollo de Chiriaco-Imaza, Bagua, Amazonas, Peru.

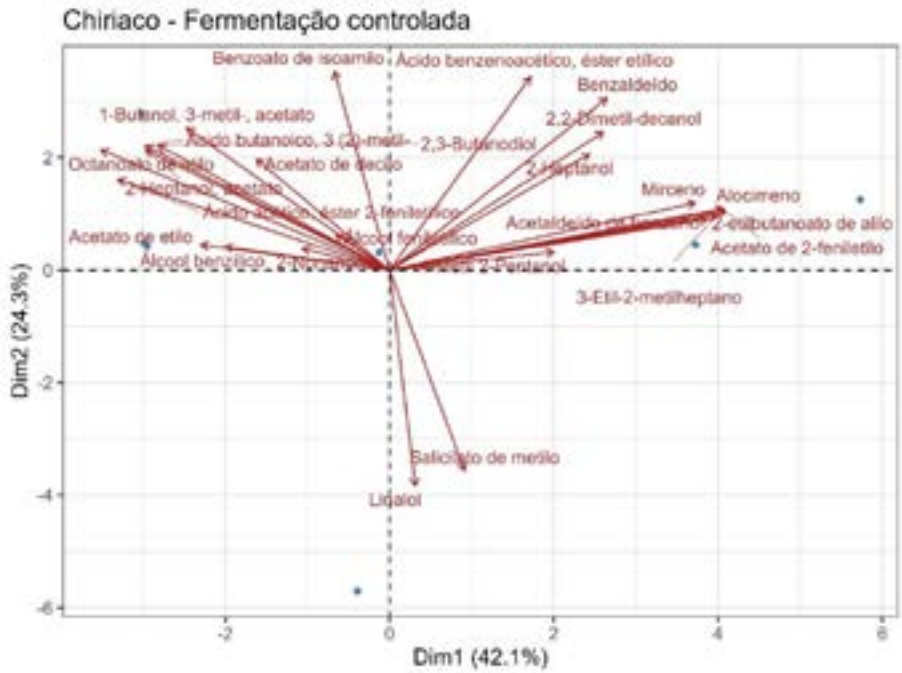


Figura 3. Análise de componentes principais (PCA) biplot representando a distribuição de compostos voláteis e sua associação com tempos de fermentação controlados com S. cerevisiae de grãos de cacau Criollo de Chiriaco-Imaza, Bagua, Amazonas, Peru.

Durante a fermentação controlada de cacau Criollo de aroma fino por *S. cerevisiae*, a presença do álcool 2,3-butanodiol (2,3-BD) foi encontrada nas amostras avaliadas (0-144 h), indicando sua formação precoce e persistência ao longo do processo. Este diol é sintetizado principalmente pela via de fermentação do piruvato, através da conversão de acetolactato em acetoína e sua subsequente redução a 2,3-butanodiol pela ação da enzima butanodiol desidrogenase [21]. Sob ação enzimática, 3-hidroxi-2-butanona (acetoína) pode ser produzida a partir de 2,3-BD, um composto amplamente utilizado como aromatizante natural de alimentos e precursor da síntese de pirazinas [20,21]. Por meio da desidrogenação do 2,3-BD, ele gera diacetil, que serve como um tempero valioso e é incorporado em bebidas alcoólicas para realçar seu sabor [22]. Por outro lado, através da esterificação do 2,3-BD e com ácido acético gerado na fermentação resulta na formação de butano-2,3-diil diacetato. Este composto

contribui para o perfil aromático de melões e bananas [23]. Microrganismos comumente presentes na fermentação do cacau, como *Klebsiella* spp., *Bacillus* spp., *Enterobacter* spp. e certas leveduras como *S. cerevisiae*, foram relatados como produtores naturais deste metabólito [18]. Do ponto de vista sensorial, o 2,3-butanodiol contribui com notas doces, cremosas e florais que estão positivamente associadas à qualidade aromática do cacau de aroma fino [24]. Sua estabilidade química, atribuída à sua baixa volatilidade relativa e à presença de dois grupos hidroxila, permite sua persistência mesmo sob condições de alta temperatura e agitação ou agitação típicas dos estágios avançados do processo de fermentação. Além disso, sua presença é considerada um indicador metabólico de fermentação equilibrada, na qual a microbiota contribui ativamente para o desenvolvimento de precursores de aromas desejados no produto final [25].

4. CONCLUSÃO

A fermentação controlada com *S. cerevisiae* em grãos de cacau Criollo de Chiriaco-Imaza permitiu obter perfis voláteis mais consistentes e enriquecidos com ésteres sensoriais importantes, enquanto a fermentação espontânea gerou uma maior diversidade de compostos, embora com variabilidade entre as etapas. Esses resultados demonstram que o uso de cultivos iniciadores é uma estratégia eficaz para direcionar a fermentação para a produção de aromas mais definidos e de maior valor em cacau de aroma fino.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Brasil; ao Programa de Doutorado em Ciências para o Desenvolvimento Sustentável da Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas; e ao Programa de Bolsas em Programas de Doutorado em Alianças Interinstitucionais do Conselho Nacional de Ciência, Tecnologia e Inovação (CONCYTEC), administrado pelo Programa PROCIENCIA sob o Contrato Nº PE501084305-2023-PROCIENCIA-BM. Também agradecem o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq-140231/2023-4) e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS 23/2551-0001858-6).

Referências

[1] D. Cortez *et al.*, “Changes in bioactive compounds during fermentation of cocoa (Theobroma cacao) harvested in Amazonas-Peru,” *Curr Res Food Sci*, vol. 6, p. 100494, Jan. 2023, doi: 10.1016/J.CRFS.2023.100494.

[2] J. Rodriguez-Campos, H. B. Escalona-Buendía, I. Orozco-Avila, E. Lugo-Cervantes, and M. E. Jaramillo-Flores, “Dynamics of volatile and non-volatile compounds in cocoa (Theobroma cacao L.) during fermentation and drying processes using principal components analysis,” *Food Research International*, vol. 44, no. 1, pp. 250–258, Jan. 2011, doi: 10.1016/J.FOODRES.2010.10.028.

[3] I. P. Tonin *et al.*, “Volatiles from cocoa bean to nibs, liquor, and chocolate: An integrated chemometric analysis of fermentation treatments with pulp reduction, malt residues, and banana peel,” *Food Chem*, vol. 487, p. 144774, Sep. 2025, doi: 10.1016/J.FOODCHEM.2025.144774.

[4] C. R. Balcázar-Zumaeta *et al.*, “Reduction in the Cocoa Spontaneous and Starter Culture Fermentation Time Based on the Antioxidant Profile Characterization,” *Foods*, vol. 12, no. 17, Sep. 2023, doi: 10.3390/foods12173291.

[5] I. M. da V. Moreira, L. de F. Vilela, C. Santos, N. Lima, and R. F. Schwan, “Volatile compounds and protein profiles analyses of fermented cocoa beans and chocolates from different hybrids cultivated in Brazil,” *Food Research International*, vol. 109, pp. 196–203, Jul. 2018, doi: 10.1016/J.FOODRES.2018.04.012.

[6] M. Utrilla-Vázquez, J. Rodríguez-Campos, C. H. Avendaño-Arazate, A. Gschaedler, and E. Lugo-Cervantes, “Analysis of volatile compounds of five varieties of Maya cocoa during fermentation and drying processes by Venn diagram and PCA,” *Food Research International*, vol. 129, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.foodres.2019.108834.

[7] E. M. Castro-Alayo, G. Idrogo-V Asquez, R. Ul Siche, and F. P. Cardenas-Toro, “Formation of aromatic compounds precursors during fermentation of Criollo and Forastero cocoa,” *Forastero cocoa. Heliyon*, vol. 5, p. 1157, 2019, doi: 10.1016/j.heliyon.2019.

[8] L. M. Coria-Hinojosa *et al.*, “Exploring volatile compounds and microbial dynamics: Kluyveromyces marxianus and Hanseniaspora opuntiae reduce Forastero cocoa fermentation time,” *Food Research International*, vol. 193, Oct. 2024, doi: 10.1016/j.foodres.2024.114821.

[9] F. Magagna *et al.*, “Comprehensive Chemical Fingerprinting of High-Quality Cocoa at Early Stages of Processing: Effectiveness of Combined Untargeted and Targeted Approaches for Classification and Discrimination,” *J Agric Food Chem*, vol. 65, no. 30, pp. 6329–6341, Aug. 2017, doi: 10.1021/ACS.JAFC.7B02167/ASSET/IMAGES/LARGE/JF-2017-021679_0005.JPEG.

[10] J. G. C. A. Chagas, N. R. Ferreira, M. B. A. Gloria, L. H. da S. Martins, and A. S. Lopes, “Chemical implications and time reduction of on-farm cocoa fermentation by Saccharomyces cerevisiae and Pichia kudriavzevii,” *Food Chem*, vol. 338, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.foodchem.2020.127834.

[11] D. M. Mestanza, M. Á. B. Gurbillón, S. M. O. Cruz, and S. G. C. Quintana, “Response surface optimization of the cacao Criollo fermentation process in the province of Utcubamba, Amazonas-Peru,” *Revista de la Facultad de Agronomia*, vol. 39, no. 1, Dec. 2022, doi: 10.47280/RevFacAgron(LUZ).v39.n1.17.

[12] C. R. Balcázar-Zumaeta *et al.*, “Reduction in the Cocoa Spontaneous and Starter Culture Fermentation Time Based on the Antioxidant Profile Characterization,” *Foods*, vol. 12, no. 17, Sep. 2023, doi: 10.3390/foods12173291.

[13] S. J. Calva-Estrada, M. Utrilla-Vázquez, A. Vallejo-Cardona, D. B. Roblero-Pérez, and E. Lugo-Cervantes, “Thermal properties and volatile compounds profile of commercial dark-chocolates from different genotypes of cocoa beans (Theobroma cacao L.) from Latin America,” *Food Research International*, vol. 136, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.foodres.2020.109594.

[14] E. Meersman *et al.*, “Tuning chocolate flavor through development of thermotolerant Saccharomyces cerevisiae starter cultures with increased acetate ester production,” *Appl Environ Microbiol*, vol. 82, no. 2, pp. 732–746, Nov. 2016, doi: 10.1128/AEM.02556-15/SUPPL_FILE/ZAM999116864SO1.PDF.

[15] A. D. D. Kouassi *et al.*, “Effect of spontaneous fermentation location on the fingerprint of volatile compound precursors of cocoa and the sensory perceptions of the end-chocolate,” *J Food Sci Technol*, vol. 59, no. 11, p. 4466, Nov. 2022, doi: 10.1007/S13197-022-05526-W.

[16] J. Tigrero-Vaca *et al.*, “Microbial Diversity and Contribution to the Formation of Volatile Compounds during Fine-Flavor Cacao Bean Fermentation,” *Foods*, vol. 11, no. 7, p. 915, Apr. 2022, doi: 10.3390/FOODS11070915/S1.

[17] X. J. Ji, H. Huang, and P. K. Ouyang, “Microbial 2,3-butanediol production: A state-of-the-art review,” *Biotechnol Adv*, vol. 29, no. 3, pp. 351–364, May 2011, doi: 10.1016/J.BIOTECHADV.2011.01.007.

[18] A. M. Białkowska, “Strategies for efficient and economical 2,3-butanediol production: new trends in this field,” *World J Microbiol Biotechnol*, vol. 32, no. 12, pp. 1–14, Dec. 2016, doi: 10.1007/S11274-016-2161-X/TABLES/1.

[19] B. Rao *et al.*, “Characterization and regulation of the 2,3-butanediol pathway in Serratia marcescens,” *Appl Microbiol Biotechnol*, vol. 93, no. 5, pp. 2147–2159, Mar. 2012, doi: 10.1007/S00253-011-3608-5/FIGURES/9.

[20] Z. Xiao and J. R. Lu, “Strategies for enhancing fermentative production of acetoin: A review,” *Biotechnol Adv*, vol. 32, no. 2, pp. 492–503, Mar. 2014, doi: 10.1016/J.BIOTECHADV.2014.01.002.

[21] G. P. Rizzi, “Effects of Sterol Biosynthesis-In-hibiting (SBI) Fungicides on Cytochrome P-450 Oxygenations in Fungi,” *Nakanishi, K. In IR Absorption Spectroscopy: Practical; Nan-kodo*, vol. 36, no. 113, p. 1743, 1988, Accessed: Aug. 04, 2025. [Online]. Available: https://pubs.acs.org/sharingguidelines

[22] P. M. Gawal and S. Subudhi, “Advances and challenges in bio-based 2,3-BD downstream purification: A comprehensive review,” *Bioresour Technol Rep*, vol. 24, p. 101638, Dec. 2023, doi: 10.1016/J.BITEB.2023.101638.

[23] R. Richard, D. Guillaume, and M. Jacquin, “Kinetics Modeling of the Heterogeneously Catalyzed Esterification of 2,3-Butanediol with Acetic Acid,” *Ind Eng Chem Res*, vol. 55, no. 18, pp. 5247–5256, May 2016, doi: 10.1021/ACS.IECR.6B00133/ASSET/IMAGES/LARGE/IE-2016-00133E_0007.JPEG.

[24] V. S. Bastos, T. M. Uekane, N. A. Bello, C. M. de Rezende, V. M. Flosi Paschoalin, and E. M. Del Aguila, “Dynamics of volatile compounds in TSH 565 cocoa clone fermentation and their role on chocolate flavor in Southeast Brazil,” *J Food Sci Technol*, vol. 56, no. 6, pp. 2874–2887, Jun. 2019, doi: 10.1007/S13197-019-03736-3/FIGURES/2.

[25] A. C. Aprotosoaie, S. V. Luca, and A. Miron, “Flavor Chemistry of Cocoa and Cocoa Products-An Overview,” *Compr Rev Food Sci Food Saf*, vol. 15, no. 1, pp. 73–91, Jan. 2016, doi: 10.1111/1541-4337.12180;CTYPE:STRING:JOURNAL.

44º SENAFOR

28ª Conferência Internacional de Forjamento - Brasil
14ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas / 11º Congresso do BrDDRG
14ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis
3ª Conferência Internacional de Inovação em Materiais e Manufatura
Porto Alegre, RS, dias 1, 2 e 3 de outubro de 2025
www.senafor.com

Simulation of Flow and Heat Transfer in Porous Media with the Lattice Boltzmann Method

Henrique M. Tavares [1]
Eduardo Cassel [2]
Rubem M. F. Vargas [3]

ABSTRACT

The selection of porous materials for heat transfer and fluid flow relies on understanding transport phenomena at the pore scale. The tortuous solid–fluid interface in porous media makes traditional CFD approaches based on Navier–Stokes equations difficult, mainly due to meshing challenges. The Lattice Boltzmann Method (LBM) offers a robust alternative by working on simple cartesian grids. This makes LBM ideal for pore-scale simulations, enabling accurate insights into how microstructure governs performance. Hot-air flow through metallic particle beds with porosities of 55, 65, and 75% was simulated. A thermal LBM model captured two-phase heat transfer with continuity conditions at the air–metal interface. Effective thermal conductivities of 95.1, 78.3, and 52.9 W/(m·K) were obtained, showing enhanced dissipation at lower porosity. Permeability values were also calculated, confirming higher flow resistance for denser media. These results directly link microstructure to effective transport properties, guiding material design. Overall, LBM proves highly capable of simulating complex porous systems for advanced heat exchanger applications.

Key words — Lattice Boltzmann; Porous media; Numerical simulation; Heat transfer

RESUMO

A seleção de materiais porosos para transferência de calor e escoamento de fluidos depende da compreensão dos fenômenos de transporte em escala de poro. A interface tortuosa entre sólido e fluido em meios porosos dificulta a aplicação de abordagens tradicionais de CFD baseadas nas equações de Navier–Stokes, principalmente devido aos desafios de geração de malha. O Método Lattice Boltzmann (LBM) surge como uma alternativa robusta por operar em grades cartesianas simples. Isso torna o LBM ideal para simulações em escala de

poro, permitindo insights precisos sobre como a microestrutura governa o desempenho. O escoamento de ar aquecido através de leitos de partículas metálicas com porosidades de 55, 65 e 75% foi simulado. Um modelo térmico em LBM capturou a transferência de calor com condições de continuidade na interface ar–metal. Foram obtidas condutividades térmicas efetivas de 95,1; 78,3 e 52,9 W/(m·K), evidenciando maior dissipação em porosidades menores. Valores de permeabilidade também foram calculados, confirmando maior resistência ao escoamento em meios mais densos. Esses resultados conectam diretamente a microestrutura às propriedades efetivas de transporte, orientando o design de materiais. Em suma, o LBM mostra-se altamente capaz de simular sistemas porosos complexos.

Palavras chave - Lattice Boltzmann; Meios porosos; Simulação numérica; Transferência de calor

1. INTRODUCTION

Porous media are ubiquitous in both natural and industrial systems, playing a critical role in applications ranging from geothermal energy extraction and filtration to chemical reactors and thermal management systems [1]. Their high surface-area-to-volume ratio makes them good choices for enhancing heat transfer, which can be useful in electronics cooling devices, and thermal energy storage units [2]. The overall efficiency of these systems is fundamentally governed by the interplay between fluid flow and heat transfer occurring at the microscopic, or pore scale. Therefore, a deep understanding of these pore-scale phenomena is essential for the design and analysis of new materials.

However, numerically solving the transport equations within the intricate geometry of porous media presents a significant challenge. Traditional computational fluid dynamics (CFD) methods, which are typically based on solving the Navier-Stokes equations using mesh-based techniques like the Finite Volume or Finite Element methods, struggle with the complex and tortuous solid-fluid interface [3]. The process of generating a high-quality, body-fitted computational mesh for such geometries is notoriously time-consuming and often becomes the primary bottleneck in the simulation workflow. These meshing difficulties can introduce numerical inaccuracies and limit the complexity of the microstructures that can be practically investigated [4].

As an alternative to conventional CFD, the Lattice Boltzmann Method (LBM) has gained prominence for simulating fluid dynamics in complex geometries [5]. Unlike traditional macroscopic solvers, the LBM is a mesoscopic method that models the fluid as a collection of particles whose distribution functions evolve on a simple, uniform cartesian lattice. This approach allows for the straightforward and accurate implementation of complex boundary conditions. Its computational efficiency and inherent parallelism make it an ideal tool for performing numerical simulations at the pore scale [6, 7]. Indeed, the LBM has been successfully employed to investigate pore-scale phenomena in a variety of contexts, including the determination of permeability in reconstructed porous media from tomographic images [8] and the analysis of convective heat transfer in complex structures like metal foams [9, 10]. These studies have demonstrated capability of the method to accurately capture detailed fluid and thermal fields within realistic porous structures.

The objective of this study is to implement and apply a thermal LBM model to directly simulate coupled fluid flow and heat transfer in digitally generated packed beds of metallic particles. By systematically varying the porosity of the media 55%, 65%, and 75%, the study aims to elucidate the direct relationship between the microstructure and the transport properties. The primary objectives are to analyze the permeability and the temperature distribution for each configuration, thereby quantifying the impact of pore geometry on both flow resistance and heat dissipation.

2. GOVERNING EQUATIONS AND NUMERICAL METHOD

2.1 Mathematical Model

The physical problem of heat transfer and fluid flow in porous media is described by a set of continuum-level transport equations. These equations represent the conservation of mass, momentum, and energy in both the fluid and solid domains. The fluid is assumed to be Newtonian and incompressible, and the thermophysical properties of both the fluid and the solid are considered constant. The simulated domain with the appropriate boundary conditions is shown in Figure 1.

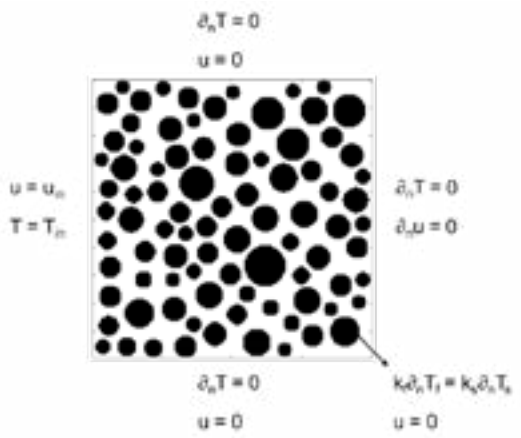


Figure 1: Porous media geometry and boundary conditions applied to simulate the flow and temperature fields.

To describe the flow in pore space, the Navier – Stokes and continuity equations are used, as follows:

$$\nabla \cdot u = 0 \tag{1}$$

$$\rho_f \left(\frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla) u \right) = -\nabla p + \mu_f \nabla^2 u \tag{2}$$

where ρ_f is the fluid density, t is time, p is the thermodynamic pressure, and μ_f is the dynamic viscosity of the fluid. The terms on the left represent inertia (transient and convective), while the terms on the right represent the pressure gradient and viscous forces, respectively.

The energy transport in the pore space is described using an advection – diffusion equation, given by:

$$\rho_f c_{p,f} \left(\frac{\partial T_f}{\partial t} + u \cdot \nabla T_f \right) = k_f \nabla^2 T_f \quad (3)$$

where T_f is the fluid temperature, $c_{p,f}$ is its specific heat capacity at constant pressure, and k_f is its thermal conductivity. Viscous dissipation and pressure work terms are neglected, which is a valid assumption for low-speed flows.

To model the energy transport in the solid matrix, a conduction model was addressed, which is written as:

$$\rho_s c_{p,s} \frac{\partial T_s}{\partial t} = k_s \nabla^2 T_s \quad (4)$$

where T_s, ρ_s, $c_{p,s}$, and ks are the temperature, density, specific heat capacity, and thermal conductivity of the solid material, respectively.

2.2 Numerical Method

The numerical simulations of fluid flow and heat transfer at the pore scale were conducted using the Lattice Boltzmann Method (LBM). This method solves a discretized form of the Boltzmann equation, where the fluid is represented by a particle distribution function, $f_i(x,t)$, which describes the probability of finding a set of particles at a lattice position x and time t, moving with a discrete velocity e_i. The evolution of the particle distribution function is governed by the lattice Boltzmann equation (LBE) with the Bhatnagar-Gross-Krook (BGK) collision operator, which simplifies the complex collision term into a single relaxation time process [11]:

$$f_i(x + e_i \Delta t, t + \Delta t) - f_i(x,t) = -\frac{1}{\tau_f} \left[f_i(x,t) - f_i^{eq}(x,t) \right] \quad (5)$$

where Δt is the time step, and τ_f is the relaxation time for the flow, which controls the kinematic viscosity, v, according to:

$$\nu = c_s^2 (\tau_f - 0.5) \Delta t \quad (6)$$

where c_s is the lattice speed of sound, defined as c_s=c/3 with c=Δx/Δt being the lattice speed (Δx is the lattice spacing).

The simulation process is split into two main steps: collision, when the right-hand side of the equation is computed, the distribution functions at each node relax towards a local equilibrium distribution function, f_i^{eq}, and streaming when left-hand side is executed, where the post-collision distribution functions are propagated to neighboring lattice nodes in the direction of their discrete velocities e_i. The equilibrium distribution function, f_i^{eq}, is a Maxwell-Boltzmann distribution truncated at the second order, ensuring that the macroscopic Navier-Stokes equations are recovered in the low Mach number limit [5]:

$$f_i^{eq} = \rho w_i \left[1 + \frac{e_i \cdot u}{c_s^2} + \frac{(e_i \cdot u)^2}{2 c_s^4} - \frac{u^2}{2 c_s^2} \right] \quad (7)$$

where w_i are the lattice weights, depending on the chosen lattice model. For this work, the D2Q9 model (2 dimensions, 9 discrete velocities) was employed, which is a standard choice for 2D hydrodynamic simulations [6].

In order to simulate the heat transfer process, a separate distribution function for the internal energy, gi(x,t), is introduced. Its evolution is governed by a similar LBE:

$$g_i(x + e_i\Delta t, t + \Delta t) - g_i(x,t) = -\frac{1}{\tau_T}\left[g_i(x,t) - g_i^{eq}(x,t)\right] \quad (8)$$

To address the numerical method and solve the equations boundary conditions were specified as follows. The no-slip velocity condition at the solid-fluid interface was enforced using the standard bounce-back scheme [12]. At this same interface, a conjugate heat transfer model guaranteed the continuity of temperature and heat flux, which is essential for determining the effective thermal conductivity of the medium [13]. Flow was driven by a pressure gradient imposed via the Zou and He condition at the inlet and outlet [14], where a constant high temperature and a zero-gradient outflow condition were respectively set for the thermal field.

3. RESULTS AND DISCUSSION

A porous system consisting of metallic particles, initially at 80 °C was percolated with air as the temperature of 20 °C. The artificially generated porous media considered polydisperse particles with log normal size distribution and a mean particle diameter of 20 mm. The physical properties of air and the particles are shown in Table 1.

Table 1: Parameters used for simulation.

	Air	Metalic Particles
ρ [kg/m³]	1.1	2700
C_p [J/kg.K]	1007	850
k [W/m.K]	2.7×10^{-2}	237
ν [m²/s]	1.5×10^{-5}	-
α [m²/s]	2.4×10^{-5}	1.0×10^{-4}

Regarding the fluid flow in the pore structure, Figure 2 illustrates the normalized velocity fields (u/u_{max}), obtained from Lattice Boltzmann Method (LBM) simulations, for flow through porous media with varying porosities (Φ). The images clearly demonstrate the dominant impact of the microstructure on flow behavior at the pore scale.

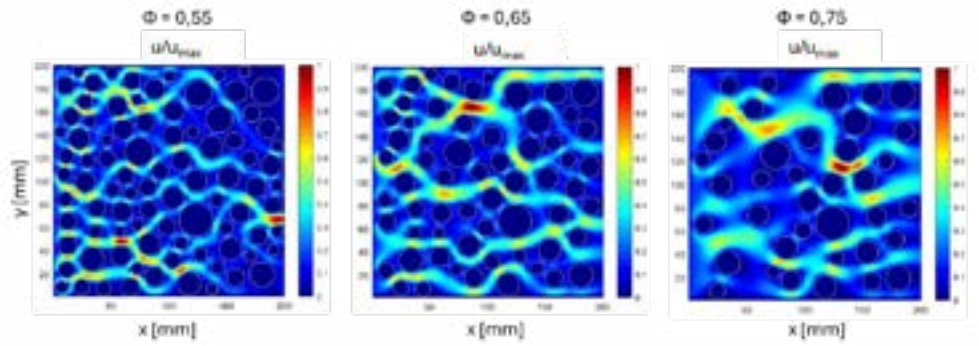


Figure 2: Normalized velocity field obtained from the LBM simulations at different porosities.

At low porosity (Φ=0.55), the flow is constrained to narrow and highly tortuous channels, leading to the formation of distinct preferential flow paths with localized high velocities. As the porosity increases (Φ=0.65 and Φ=0.75), the void space becomes larger and more interconnected. This results in a more homogeneous velocity distribution and a reduction in the channeling effect. This pore-scale behavior directly governs the macroscopic permeability of the medium; higher porosity offers less flow resistance, leading to higher permeability [15]. Pore-scale simulations using LBM are a powerful tool for quantifying this direct link between structure and effective transport properties [8].

Figure 3 displays the resulting temperature profiles from the conjugate heat transfer simulations for the three microstructures. The images reveal that the overall heat transfer performance is dependent on porosity.

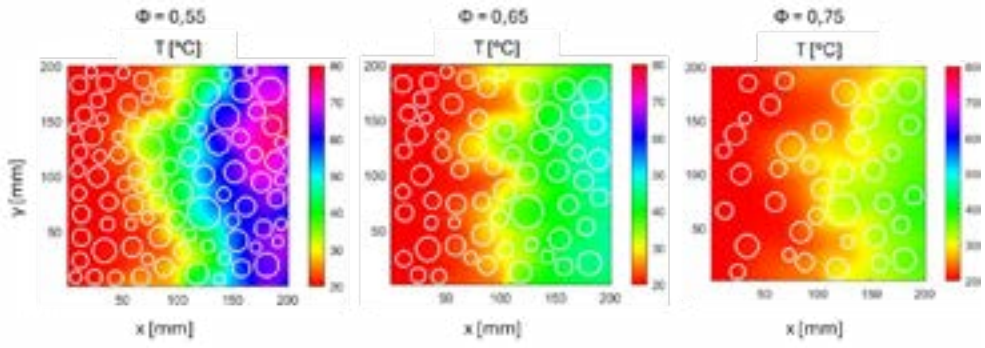


Figure 3: Temperature distributions for t = 30 s and different void fractions.

In the low-porosity case, the high solid fraction and large interfacial area between the fluid and the particles promote highly efficient thermal exchange. The fluid is forced into intimate contact with the solid matrix, leading to a steep temperature gradient across the domain. This configuration yields a high effective thermal conductivity (k_{eff}) for the medium [2].

Conversely, in the high-porosity case (right, likely Φ=0.75), the hot fluid passes through wide preferential channels, bypassing significant portions of the solid matrix. This phenomenon reduces the overall heat transfer efficiency as the fluid exits the domain at a lower average temperature. This results in a shallower temperature gradient and a lower effective thermal conductivity [16]. LBM simulations that couple flow and conjugate heat transfer are therefore essential for capturing these pore-scale effects and optimizing the thermal design of porous materials.

Regarding the properties calculated for the porous media used in the simulation, Table 2 summarizes the macroscopic transport properties—effective thermal conductivity (k_{eff}) and permeability (κ)—calculated from the LBM simulations for each porosity (Φ). The permeability was calculated using Darcy's law and the effective thermal conductivity was calculated using:

$$k_{eff} = -\frac{L}{T_{left} - T_{right}} \left[\frac{1}{N_{cols}} \sum_{j} \left(\frac{1}{N_y} \sum_{i} q_x(i,j) \right) \right] \tag{9}$$

where T_{left} and T_{right} are the temperatures in the two faces of the porous media, N_{cols} is the number of discrete columns and Ny is the number of grid points in y direction, which together aim to account for the average heat flux in the 2D domain and q_x is the heat flux estimated from the Fourier law.

Table 2: Calculated values of effective thermal conductivity and permeability of the bed.

ϕ	k_{eff} (parallel) [W/m.K]	k_{eff} (LBM) [W/m.K]	κ (LBM) [m²]
0.55	102.7	95.1	2.36×10^{-7}
0.65	84.1	78.3	1.46×10^{-6}
0.75	49.6	52.9	5.73×10^{-6}

The results provide a quantitative link between the pore-scale structure and the material's overall performance. Also, the effective conductivity calculation was compared with the parallel resistance model [1] given by:

$$k_{eff} = \phi.k_f + (1-\phi).k_s \quad (10)$$

The effective thermal conductivity, a key metric for heat exchange performance, was found to decrease significantly as porosity increased. The LBM results show keff dropping from 95.1 W/(m·K) at Φ=0.55 to 52.9 W/(m·K) at Φ=0.75. This trend is physically expected, as a higher porosity implies a smaller fraction of the highly conductive solid phase, which dominates the heat transfer process [2]. As observed in the temperature profiles, the denser packing at lower porosity creates more continuous pathways for heat conduction and forces better fluid-solid thermal interaction. For comparison, the table includes values from a simple one-dimensional thermal resistance model (Series model), which shows a similar trend. However, such analytical models cannot capture the complex heat flow paths resolved by the LBM simulations, highlighting the importance of pore-scale modeling [13].

Permeability, which quantifies the ease of fluid flow through the medium, shows a strong and opposite trend. The LBM-calculated permeability increases by more than an order of magnitude, from 2.36×10^{-7} m² to 5.73×10^{-6} m² as porosity rises from 0.55 to 0.75. This is because higher porosity provides larger, less tortuous channels for the fluid to pass through, significantly reducing flow resistance. This result is in direct agreement with the velocity fields previously shown, where higher porosity led to more uniform flow and less severe channeling. Permeability is the fundamental property in Darcy's Law, and its strong dependence on microstructure is well-established through semi-empirical relations like the Kozeny-Carman equation [13]. The ability of LBM to compute permeability directly from geometry makes it an invaluable tool for designing porous media with specific hydraulic characteristics [8].

4. CONCLUSION

This study successfully demonstrated the application of the Lattice Boltzmann Method for the pore-scale simulation of coupled fluid flow and conjugate heat transfer in porous media, providing a quantitative link between microstructure and macroscopic transport properties. The simulations revealed that while higher porosity significantly reduces flow resistance, increasing permeability by over an order of magnitude as porosity rose from 0.55 to 0.75, which simultaneously degrades thermal performance.

The effective thermal conductivity decreased from 95.1 W/m·K to 52.9 W/m·K over the same range, primarily due to the phenomenon where fluid channels through the void space with minimal solid contact. This highlights a critical trade-off between hydraulic and thermal efficiency. Overall, the LBM proved to be a robust tool for capturing these complex pore-scale effects that simple analytical models cannot resolve, providing valuable insights into the design and optimization of materials for advanced thermal applications where this balance is a key design criterion.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to acknowledge the financial support provided by CAPES.

REFERENCES

[1] Nield, D. A., & Bejan, A. (2017). *Convection in Porous Media* (5th ed.). Springer.
[2] Kaviany, M. (1995). *Principles of Heat Transfer in Porous Media* (2nd ed.). Springer-Verlag.
[3] Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method* (2nd ed.). Pearson Education.
[4] Cundall, P. A., & Strack, O. D. L. (1979). A discrete numerical model for granular assemblies. *Géotechnique*, 29(1), 47-65. https://doi.org/10.1680/geot.1979.29.1.47
[5] Chen, S., & Doolen, G. D. (1998). Lattice Boltzmann method for fluid flows. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 30(1), 329-364. https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.30.1.329
[6] Guo, Z., & Shu, C. (2013). *Lattice Boltzmann Method and Its Applications in Engineering*. World Scientific.
[7] Boek, E. S., & Venturoli, M. (2010). Lattice-Boltzmann studies of fluid flow in porous media with realistic rock geometries. *Computers & Mathematics with Applications*, 59(7), 2305-2314. https://doi.org/10.1016/j.camwa.2009.08.063
[8] Manwart, C., Aaltosalmi, U., Koponen, A., Hilfer, R., & Timonen, J. (2002). Lattice-Boltzmann and finite-difference simulations for the permeability for three-dimensional porous media. *Physical Review E*, 66(1), 016702. https://doi.org/10.1103/PhysRevE.66.016702
[9] Qin, Jie et al. Pore-scale investigation on flow boiling heat transfer mechanisms in open-cell metal foam by LBM. International Communications in Heat and Mass Transfer, v. 110, p. 104418, 2020. https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2019.104418
[10] Seta, Takeshi; Takegoshi, Eishun; Okui, Kenichi. Lattice Boltzmann simulation of natural convection in porous media. Mathematics and Computers in Simulation, v. 72, n. 2-6, p. 195-200, 2006. https://doi.org/10.1016/j.matcom.2006.05.013
[11] Bhatnagar, P. L., Gross, E. P., & Krook, M. (1954). A model for collision processes in gases. I. Small amplitude processes in charged and neutral one-component systems. *Physical Review*, 94(3), 511. https://doi.org/10.1103/PhysRev.94.511
[12] Ladd, A. J. C. (1994). Numerical simulations of particulate suspensions via a discretized Boltzmann equation. Part 1. Theoretical foundation. *Journal of Fluid Mechanics*, 271, 285-309. https://doi.org/10.1017/S0022112094001771
[13] Li, Like et al. Conjugate heat and mass transfer in the lattice Boltzmann equation method. Physical Review E, v. 89, n. 4, p. 043308, 2014. https://doi.org/10.1103/PhysRevE.89.043308
[14] Zou, Q., & He, X. (1997). On pressure and velocity boundary conditions for the lattice Boltzmann BGK model. *Physics of Fluids*, 9(6), 1591-1598. https://doi.org/10.1063/1.869307
[15] Bear, J. (1972). *Dynamics of Fluids in Porous Media*. American Elsevier Publishing Company.
[16] Askari, R.; Taheri, S.; Hejazi, S. H. Thermal conductivity of granular porous media: A pore scale modeling approach. Aip Advances, v. 5, n. 9, 2015. https://doi.org/10.1063/1.4930258

44º SENAFOR

28ª Conferência Internacional de Forjamento - Brasil
14ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas / 11º Congresso do BrDDRG
14ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis
3ª Conferência Internacional de Inovação em Materiais e Manufatura
Porto Alegre, RS, dias 1, 2 e 3 de outubro de 2025
www.senafor.com

Cálculo de propriedades para o equilíbrio sólido-líquido preditivo voltado a produtos naturais

Juan José Mora Fajardo [(1)]
Eduardo Cassel [(2)]
Rubem Mário Figueiró Vargas [(3)]

ABSTRACT

The predictive calculation of thermodynamic properties required for solid–liquid equilibrium (SLE) is a key step in the design of processes involving natural products. Experimental determination of fusion enthalpy, fusion temperature, critical properties, vapor pressure, and acentric factor is often limited by cost, time, and availability of pure samples, especially for complex bioactive molecules. In this context, predictive models provide an essential alternative. This work compares two families of methods: group contribution models (Joback and Abdulelah-Gani) and the quantum-based COSMO-RS. Group contribution methods, while computationally efficient and broadly used, show limitations when applied to polar and structurally complex molecules. COSMO-RS, on the other hand, showed relatively better performance in the prediction of critical properties compared to its own results for other parameters, but it did not outperform the group contribution methods in these same properties. Statistical analysis using Average Absolute Relative Deviation (AARD) and Root Mean Square Error (RMSE) revealed that group contribution methods remain more accurate for boiling point, vaporization enthalpy, and solid-phase parameters. Among them, Abdulelah-Gani presented the most balanced performance, confirming the complementary nature of predictive approaches for SLE studies involving natural products.

RESUMO

O cálculo preditivo de propriedades termodinâmicas necessárias ao equilíbrio sólido-líquido (ESL) é etapa fundamental no projeto de processos envolvendo produtos naturais. A determinação experimental da entalpia e da temperatura de fusão, propriedades críticas, pressão de vapor e fator acêntrico é frequentemente limitada por

custo, tempo e disponibilidade de amostras puras, especialmente no caso de moléculas bioativas complexas. Nesse contexto, modelos preditivos constituem alternativa essencial. Este trabalho compara duas famílias de métodos: os modelos de contribuição de grupos (Joback e Abdulelah-Gani) e o método quântico COSMO-RS. Os métodos de contribuição de grupos, embora eficientes e amplamente utilizados, apresentam limitações quando aplicados a moléculas polares e estruturalmente complexas. O COSMO-RS, por sua vez, apresentou desempenho relativamente melhor na predição de propriedades críticas em comparação aos seus próprios resultados para outros parâmetros, mas não superou os métodos de contribuição de grupos nessas mesmas propriedades. A análise estatística por meio de Desvio Relativo Médio Absoluto (AARD) e Erro Quadrático Médio (RMSE) revelou que os métodos de contribuição de grupos continuam mais precisos para ponto de ebulição, entalpia de vaporização e parâmetros da fase sólida. Entre eles, o modelo de Abdulelah-Gani apresentou o desempenho mais equilibrado, confirmando o caráter complementar das abordagens preditivas para estudos de ESL envolvendo produtos naturais.

1. INTRODUÇÃO

O equilíbrio sólido-líquido (ESL) é um fenômeno de relevância central em diversas áreas da ciência e engenharia, pois está associado tanto a processos industriais tradicionais quanto a aplicações emergentes em biotecnologia e farmacotécnica. Em metalurgia, por exemplo, o ESL é essencial para a produção e tratamento térmico de ligas, enquanto em ciência de materiais fornece a base para o desenvolvimento de polímeros e sistemas de liberação controlada de fármacos. Já na área de bioprocessos, a modelagem do ESL é empregada na extração e purificação de compostos bioativos presentes em matrizes naturais, como flavonoides, alcaloides e terpenos.

A modelagem do ESL depende diretamente de propriedades termodinâmicas de compostos puros, como entalpia e temperatura de fusão, propriedades críticas (temperatura e pressão crítica), pressão de saturação e fator acêntrico. Essas propriedades constituem os parâmetros de entrada em equações de isofugacidade que descrevem o equilíbrio sólido-líquido, permitindo prever condições de solubilidade, pureza e miscibilidade em misturas complexas.

A obtenção experimental dessas propriedades, entretanto, enfrenta obstáculos. Compostos de origem natural, muitas vezes instáveis ou disponíveis em quantidades limitadas, dificultam experimentos de calorimetria ou de determinação PVT. Além disso, o custo e o tempo envolvidos tornam inviável a caracterização de grandes bases de dados de moléculas, principalmente quando se pretende explorar cenários de prospecção de novos compostos ou solventes.

Nesse contexto, o uso de métodos preditivos é uma alternativa fundamental. Os métodos de contribuição de grupos (GCM) surgem como ferramentas rápidas e de baixo custo computacional, permitindo a estimativa de propriedades críticas a partir da decomposição estrutural da molécula. Métodos como os de Joback e Abdulelah-Gani [1,2] têm sido amplamente usados em pacotes de simulação e bancos de dados industriais. Por outro lado, abordagens mais recentes baseadas em cálculos de química quântica, como o COSMO-RS, ampliam a aplicabilidade para moléculas de elevada complexidade estrutural e funcional, comuns em produtos extraídos de matérias-primas de origem vegetal.

A análise crítica desses métodos e de seu desempenho preditivo é necessária para orientar a escolha da técnica mais adequada em diferentes cenários e para moléculas de diferentes famílias. Em aplicações onde há disponibilidade limitada de

dados experimentais e alta variabilidade estrutural dos compostos, a confiabilidade da predição é determinante para a viabilidade do estudo. Assim, este trabalho busca comparar métodos de contribuição de grupos e métodos quânticos, destacando suas vantagens, limitações e adequação ao cálculo preditivo do equilíbrio sólido-líquido em sistemas com carência de dados experimentais.

2. MODELOS PREDITIVOS PARA PREDIÇÃO DE PROPRIEDADES

2.1. Equilíbrio sólido-líquido e propriedades termodinâmicas associadas

O equilíbrio sólido-líquido (ESL) é um fenômeno fundamental em diversas áreas da engenharia e da ciência dos materiais, definido pela condição em que a fase sólida e a fase líquida de um ou mais compostos coexistam em equilíbrio. Em termos termodinâmicos, essa condição é satisfeita quando o potencial químico — ou, de forma equivalente, a fugacidade — de cada componente é o mesmo nas duas fases:

$$\mu_i^S = \mu_i^L \quad \Leftrightarrow \quad f_i^S = f_i^L \tag{1}$$

A descrição adequada desse equilíbrio é essencial em operações como cristalização, purificação de substâncias, desenvolvimento de formulações farmacêuticas e extração de compostos bioativos [3].

Para que seja possível prever o ESL de forma quantitativa, algumas propriedades termodinâmicas de compostos puros são indispensáveis. Entre elas, a temperatura de fusão e a entalpia de fusão ocupam papel central, pois definem a transição entre as fases sólida e líquida em condições de equilíbrio. Esses parâmetros aparecem diretamente na expressão clássica de solubilidade:

$$\ln x_i = \frac{\Delta H_{fus}}{R}\left(\frac{1}{T_m} - \frac{1}{T}\right) \tag{2}$$

onde x_i é a fração molar de soluto dissolvido, ΔH_{fus} é a entalpia de fusão, T_m a temperatura de fusão e T a temperatura de equilíbrio.

Além disso, propriedades relacionadas ao comportamento da fase fluida também são necessárias. A temperatura crítica (T_c), a pressão crítica (P_c) e o volume crítico (V_c) são parâmetros que permitem calcular coeficientes de fugacidade por meio de equações de estado. O fator acêntrico (ω) complementa esse conjunto, pois ajusta a descrição da pressão de vapor em função da temperatura. A pressão de saturação (P_{sat}) também desempenha papel essencial e pode ser obtida a partir da entalpia de vaporização utilizando a forma integrada da equação de Clausius–Clapeyron:

$$\ln\left(\frac{P_{sat}(T)}{P_{ref}}\right) = -\frac{\Delta H_{vap}}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right) \tag{3}$$

onde ΔH_{vap} é a entalpia molar de vaporização, T_{ref} e P_{ref} são condições de referência e R é a constante universal dos gases [4].

Combinando essas informações, aplica-se o critério de isofugacidade para sólidos dissolvidos em líquidos, que pode ser expresso como:

$$f_i^S = \gamma_i\, x_i\, f_i^{L,ref} \tag{4}$$

onde γi é o coeficiente de atividade do soluto e $f_i^{L,ref}$ a fugacidade de referência da fase líquida, calculada a partir de T_c, P_c, V_c, ω e P_{sat}.

Portanto, a capacidade de prever o equilíbrio sólido-líquido está diretamente vinculada à disponibilidade e à confiabilidade desse conjunto relativamente pequeno,

mas essencial, de propriedades termodinâmicas. A dificuldade de determiná-las experimentalmente para compostos complexos, especialmente os de origem natural, reforça a importância de métodos preditivos que permitam estimar ΔH_{fus}, T_m, parâmetros críticos, fator acêntrico, pressão de saturação e ΔH_{vap} de maneira consistente.

2.2. Métodos de contribuição de grupos

Os métodos de contribuição de grupos (*Group Contribution Methods* – GCM) representam uma abordagem bastante difundida para a estimativa de propriedades físico-químicas e termodinâmicas de compostos orgânicos. O princípio que os sustenta é a possibilidade de decompor uma molécula em partes menores, chamadas grupos funcionais, assumindo que cada um deles exerce uma contribuição regular e previsível sobre determinada propriedade. Dessa forma, o valor final da propriedade pode ser obtido pela soma das parcelas atribuídas a cada grupo presente na estrutura molecular.

A hipótese central desses métodos é a consistência das contribuições de grupos. Considera-se que a influência de um mesmo grupo funcional sobre determinada propriedade seja praticamente independente da molécula onde ele está inserido. Assim, a presença de um grupo metila ($–CH_3$), por exemplo, exerce impacto semelhante na entalpia de vaporização ou na pressão crítica em diferentes compostos. Essa premissa simplifica a estimativa de dados e permite que bancos de parâmetros já existentes sejam utilizados para prever propriedades de substâncias ainda não caracterizadas experimentalmente.

O método de Joback [1] foi um dos primeiros a ganhar ampla aceitação. Ele se destacou por sua simplicidade, permitindo calcular rapidamente propriedades como temperatura e pressão críticas, temperatura de ebulição e entalpia de formação. Sua grande limitação, no entanto, está na base restrita de grupos, o que leva a erros maiores quando aplicado a moléculas polares, compostos de alta massa molecular ou estruturas mais complexas.

Buscando superar essas limitações, surgiu o método de Constantinou–Gani [5], que introduziu os chamados subgrupos de segunda ordem. Essa abordagem aumentou o nível de detalhe com que a estrutura molecular é representada, ampliando o domínio de aplicação e melhorando a precisão, especialmente em compostos polares e de maior complexidade estrutural.

Mais tarde, o método de Marrero–Gani [6] trouxe um refinamento adicional ao organizar os grupos de forma hierárquica, em até três níveis. Esse modelo aumentou significativamente a flexibilidade, permitindo lidar com moléculas maiores e mais diversas, além de melhorar a estimativa de propriedades críticas e volumétricas.

A trajetória dos métodos de contribuição de grupos mostra uma transição de modelos simples, desenvolvidos para fornecer praticidade e rapidez de aplicação, para versões mais sofisticadas, capazes de representar moléculas complexas com maior nível de detalhe. Apesar dos avanços, todos esses métodos carregam a limitação inerente ao caráter aditivo, que não descreve de forma adequada efeitos específicos como interações de hidrogênio, ressonância eletrônica ou aspectos estereoquímicos. Mesmo com essas restrições, eles representam uma alternativa prática e amplamente utilizada para a predição de propriedades em situações nas quais dados experimentais não estão disponíveis.

2.3. Teoria COSMO e o modelo COSMO-RS

A teoria COSMO (*Conductor-like Screening Model*) [7] surgiu como um método de química quântica voltado para descrever moléculas em meio contínuo. Nessa abordagem, a molécula é posicionada em um condutor perfeito, o que permite calcular

a distribuição de cargas superficiais que resulta da interação entre a densidade eletrônica e o meio dielétrico. O resultado desse cálculo é um mapa de densidades de carga, conhecido como superfície COSMO, que fornece uma representação detalhada do potencial de interação da molécula com o ambiente.

O modelo COSMO-RS (*COSMO for Real Solvents*) evoluiu a partir dessa base, ao combinar as informações quânticas obtidas no COSMO com princípios de termodinâmica estatística. A ideia central é transformar as superfícies de carga das moléculas em perfis de distribuição, chamados de perfil-sigma (*σ-profiles*), que descrevem a frequência relativa de diferentes cargas ao longo da superfície molecular. Esses perfis podem então ser combinados estatisticamente para calcular interações entre moléculas, resultando em previsões de propriedades relacionadas ao equilíbrio de fases [7].

O COSMO-RS permite estimar coeficientes de atividade, pressões de vapor, entalpias de mistura e solubilidades, além de propriedades derivadas como o fator acêntrico. A grande vantagem desse método é que ele não depende de ajustes empíricos baseados em dados experimentais extensivos. Uma vez realizada a etapa inicial de cálculo quântico da molécula, é possível aplicar o modelo para prever propriedades de compostos novos ou pouco estudados, o que o torna particularmente atraente em áreas como fármacos e produtos naturais.

Apesar de seu potencial, o COSMO-RS apresenta limitações. O custo computacional associado à etapa quântica é mais elevado em comparação com os métodos de contribuição de grupos, e a qualidade dos resultados depende diretamente do nível de teoria utilizado nos cálculos eletrônicos (como a escolha da função de densidade ou do conjunto de bases). Além disso, propriedades fortemente dependentes da fase sólida, como entalpias de fusão, ainda apresentam maiores incertezas, pois a descrição estatística foi originalmente desenvolvida para líquidos, logo, propriedades dependentes da fase sólida não são calculadas pelo COSMO-RS.

O COSMO-RS constitui um avanço relevante na predição de propriedades, por combinar fundamentação teórica rigorosa com a possibilidade de aplicação a moléculas estruturalmente complexas. Apesar de não substituir a validação experimental e de exigir maior custo computacional, o método amplia de forma expressiva as possibilidades de modelagem termodinâmica, sobretudo em situações nas quais os métodos baseados em contribuições de grupos mostram desempenho limitado [8].

3. METODOLOGIA

Para o cálculo das propriedades usando os métodos de contribuição de grupos, foi utilizado a biblioteca ugropy no Python, que possui os pesos para cada grupo dos dois métodos de GCM que serão utilizados. Nessa biblioteca é feita de forma automática a transformação do código Smiles em notação de Kekulé, processo conhecido como *Kekulization*. A partir da notação de Kekulé, é possível usar os grupos dos métodos GCM para comparação [9].

O cálculo das propriedades usando COSMO-RS foi feito usando o software TmoleX para a minimização da energia das moléculas e geração dos perfis-sigma. Neste software, apenas com o código Smiles já é possível realizar a geração dos dados necessários para uso posterior do COSMO-RS. No TmoleX, foi utilizando o método COSMO-BP (um tipo de cálculo baseado no funcional de troca-correlação BP86) em conjunto com o conjunto de bases TZVP (Triple Zeta Valence Polarized). Este conjunto de bases pe suficientemente robusto para fornecer descrições precisas das superfícies

de cargas. As propriedades foram preditas pelo método COSMO-RS no software COSMOtherm. Os dados de entrada para o COSMOtherm são os arquivos .cosmo gerados pelo TmoleX para as moléculas minimizadas.

Neste trabalho foi feito o comparativo entre dois métodos de contribuição de grupos: Joback e Abdulelah-Gani e o método COSMO-RS. As propriedades preditas comparadas seguem na tabela abaixo.

Tabela 1 – Relação das propriedades e Modelos testados

	COSMO-RS	Joback	Abdulelah-Gani
P_c	X	X	X
T_c	X	X	X
V_c	X	X	X
ω	X	X	X
T_b	X	X	X
H_v	X	X	X
T_m	-	X	X
H_{fus}	-	X	X

A temperatura de fusão e entalpia de fusão não puderam ser calculadas pelo método do COSMO-RS devido limitações do método referente a compostos no estado sólido, provenientes da formulação geral do método.

4. RESULTADOS

A comparação entre os métodos de contribuição de grupos (Joback e Abdulelah-Gani) e o método quântico COSMO-RS permitiu avaliar o desempenho relativo de cada abordagem frente aos valores experimentais disponíveis. A qualidade da predição foi medida pelos indicadores estatísticos Average Absolute Relative Deviation (AARD) e Root Mean Square Error (RMSE), permitindo uma análise quantitativa da consistência dos resultados e da magnitude dos desvios.

Tabela 2 – Resultados da predição das propriedades

	COSMO-RS		Joback		Abdulelah-Gani	
	AARD	RMSE	AARD	RMSE	AARD	RMSE
P_c (bar)	10,214%	5,83	5,082%	2,83	4,218%	2,42
T_c (K)	3,849%	34,25	4,156%	48,05	2,262%	30,22
V_c (cm³/mol)	5,974%	29,81	3,252%	24,32	2,479%	21,17
ω	32,697%	0,23	13,685%	0,16	12,552%	0,10
T_b (K)	25,410%	136,81	4,165%	35,27	2,860%	27,86
H_v (kJ/mol)	27,173%	18,74	7,445%	5,53	30,438%	15,68
T_m (K)	-	-	12,980%	46,53	11,735%	47,04
H_{fus} (kJ/mol)	-	-	52,088%	6,81	37,609%	5,83

A comparação entre os métodos de contribuição de grupos e o COSMO-RS evidenciou diferenças significativas no desempenho em função da propriedade

avaliada. A análise dos desvios médios relativos (AARD) e dos desvios quadráticos médios (RMSE) mostrou que o COSMO-RS foi mais consistente na predição de propriedades críticas, em especial na temperatura crítica, onde apresentou AARD de 3,85% e RMSE de 34,25 K, superando o método Joback e aproximando-se do Abdulelah-Gani, que apresentou o menor erro relativo (2,26%). Para a pressão crítica, entretanto, os métodos de contribuição de grupos mostraram maior precisão, com destaque para Abdulelah-Gani (AARD de 4,22% e RMSE de 2,42 bar), enquanto o COSMO-RS exibiu desempenho inferior (AARD de 10,21% e RMSE de 5,83 bar).

O comportamento foi semelhante no volume crítico, onde os métodos de contribuição de grupos mantiveram melhor ajuste em relação aos valores experimentais. O Abdulelah-Gani apresentou RMSE de 21,17 cm^3/mol e AARD de 2,48%, enquanto o COSMO-RS foi mais disperso, com RMSE de 29,81 cm^3/mol. No fator acêntrico, os métodos de contribuição de grupos também superaram o COSMO-RS: o Abdulelah-Gani apresentou RMSE de 0,10 e AARD de 12,55%, contra 0,23 e 32,70% do COSMO-RS, que se mostrou limitado na descrição dessa propriedade.

A maior discrepância entre os métodos foi observada para propriedades associadas à fase líquida. Na temperatura de ebulição, o COSMO-RS apresentou valores de AARD e RMSE bastante elevados (25,41% e 136,81 K), enquanto os métodos de contribuição de grupos tiveram melhor desempenho, em especial o Abdulelah-Gani, que alcançou AARD de 2,86% e RMSE de 27,86 K. A entalpia de vaporização seguiu a mesma tendência: o COSMO-RS apresentou RMSE de 18,74 kJ/mol, enquanto o Joback atingiu o melhor desempenho, com RMSE de 5,53 kJ/mol e AARD de 7,45%, seguido pelo Abdulelah-Gani, que foi menos preciso nessa propriedade.

As propriedades sólidas só puderam ser avaliadas pelos métodos de contribuição de grupos, dado que o COSMO-RS não fornece T_m nem ΔH_{fus}. Os resultados mostraram desvios ainda elevados, refletindo a dificuldade desses modelos em representar propriedades fortemente dependentes da fase sólida. Na temperatura de fusão, os erros relativos ficaram próximos entre os dois métodos, com AARD de 12,98% para Joback e 11,74% para Abdulelah-Gani, e RMSE em torno de 47 K. Já para a entalpia de fusão, Abdulelah-Gani apresentou desempenho superior, com AARD de 37,61% e RMSE de 5,83 kJ/mol, frente a 52,09% e 6,81 kJ/mol do Joback.

Os resultados demonstram que o COSMO-RS se destaca na predição de propriedades críticas e apresenta aplicabilidade em compostos estruturalmente complexos, mas mostra limitações importantes em propriedades associadas à fase líquida, o que se deve a forma como são calculados essas propriedades, que dependem de propriedades também preditas pelo COSMO-RS, logo, os erros de outros parâmetros causam erros ainda maiores na predição das propriedades da fase líquida.

Os métodos de contribuição de grupos constituem ferramentas amplamente utilizadas para a estimativa de propriedades termodinâmicas, oferecendo simplicidade de aplicação e baixo custo computacional. Dentro desse conjunto, o método Abdulelah-Gani apresentou desempenho mais equilibrado, com maior consistência estatística e capacidade de representar adequadamente diferentes propriedades, o que se deve ao maior número de grupos existentes no modelo e na criação de subgrupos, o que confere maior precisão para o modelo de Abdulelah-Gani. Já o método Joback, embora historicamente relevante e de implementação bastante direta, mostrou limitações importantes, com resultados satisfatórios apenas para a entalpia de vaporização e desempenho inferior nas demais propriedades.

5. CONCLUSÃO

A comparação entre métodos de contribuição de grupos e o modelo quântico COSMO-RS evidencia que não existe uma abordagem universalmente superior para a predição de propriedades termodinâmicas necessárias ao equilíbrio sólido-líquido. O COSMO-RS apresentou melhor desempenho relativo na predição de propriedades críticas em comparação com seu próprio resultado em outras propriedades, mas não superou os métodos de contribuição de grupos nessas mesmas grandezas. Já os métodos de contribuição de grupos confirmaram sua utilidade prática em propriedades associadas às fases líquida e sólida, apresentando menor custo e maior simplicidade de aplicação. Entre eles, o modelo de Abdulelah-Gani se destacou pela maior consistência estatística e equilíbrio entre diferentes propriedades, superando Joback em diversos casos. Os resultados confirmam o caráter complementar dessas abordagens, indicando que a escolha do método deve considerar tanto a disponibilidade de recursos computacionais quanto a natureza da molécula estudada e as propriedades de interesse. Assim, o uso combinado de GCM e COSMO-RS se mostra uma estratégia promissora para estudos de equilíbrio sólido-líquido envolvendo produtos naturais.

REFERÊNCIAS

[1] Joback KG, Reid RC. ESTIMATION OF PURE-COMPONENT PROPERTIES FROM GROUP-CONTRIBUTIONS. Chemical Engineering Communications 1987;57:233–43. https://doi.org/10.1080/00986448708960487.

[2] Alshehri AS, Tula AK, You F, Gani R. Next generation pure component property estimation models: With and without machine learning techniques. AIChE Journal 2022;68:e17469. https://doi.org/10.1002/aic.17469.

[3] Song Z, Wang J, Sundmacher K. Evaluation of COSMO-RS for solid–liquid equilibria prediction of binary eutectic solvent systems. Green Energy & Environment 2021;6:371–9. https://doi.org/10.1016/j.gee.2020.11.020.

[4] Koutsoyiannis D. Clausius–Clapeyron equation and saturation vapour pressure: simple theory reconciled with practice. Eur J Phys 2012;33:295–305. https://doi.org/10.1088/0143-0807/33/2/295.

[5] Constantinou L, Gani R. New group contribution method for estimating properties of pure compounds. AIChE Journal 1994;40:1697–710. https://doi.org/10.1002/aic.690401011.

[6] Marrero J, Gani R. Group-contribution based estimation of pure component properties. Fluid Phase Equilibria 2001;183–184:183–208. https://doi.org/10.1016/S0378-3812(01)00431-9.

[7] Klamt A. The COSMO and COSMO-RS solvation models. WIREs Comput Mol Sci 2011;1:699–709. https://doi.org/10.1002/wcms.56.

[8] Moity L, Durand M, Benazzouz A, Pierlot C, Molinier V, Aubry J-M. Panorama of sustainable solvents using the COSMO-RS approach. Green Chem 2012;14:1132. https://doi.org/10.1039/c2gc16515e.

[9] Brandolín SE, Benelli FE, Magario I, Scilipoti JA. Ugropy : An Extensible Python Package for Thermodynamic Model Functional Group Identification via Mathematical Optimization. Ind Eng Chem Res 2025:acs.iecr.5c02552. https://doi.org/10.1021/acs.iecr.5c02552.

44º SENAFOR

3ª Conferência Internacional de Inovação em Materiais e Manufatura – INOVMAT

3nd International Conference on Innovation in Materials and Manufacturing

Hotel Plaza São Rafael, Porto Alegre/RS - 1, 2 e 3 de outubro de 2025.

DESENVOLVIMENTO DE BIOFILMES À BASE DE QUITOSANA INCORPORADOS COM MICROCRISTAIS DE CELULOSE

Cristiane K. Santin, Universidade do Vale dos Sinos [1]
Thais Henz Paim de Almeida, Universidade do Vale dos Sinos [2]

RESUMO

Devido aos impactos ambientais causados pelo uso indiscriminado e descarte inadequado de plásticos, o desenvolvimento de embalagens com potencial biodegradável tem impulsionado pesquisas tanto no âmbito acadêmico quanto industrial. Neste contexto a quitosana tem sido amplamente investigada como substrato para obtenção de biofilmes e blendas poliméricas com características bioativas, porém apresenta baixas propriedades mecânicas que podem ser melhoradas com a inserção de aditivos de reforço. Com este enfoque a celulose apresenta-se como uma matéria-prima de fonte natural, baixo custo, abundante, com propriedades de interesse, e fácil funcionalização. Na presente pesquisa, microcristais de celulose (MCCs) foram extraídos a partir do bagaço de uva, e utilizados como agente de reforço na produção de filmes a base de quitosana. Os filmes exibiram aparência homogênea, textura lisa e resistência ao manuseio. Os resultados indicaram que a adição de MCCs tornou os filmes menos suscetíveis à ação da umidade, propriedade importante e desejável na manufatura de embalagens.

Palavras-chave: “microcristais de celulose”, “bagaço de uva”, “quitosana”, “embalagem”.

DEVELOPMENT OF CHITOSAN-BASED BIOFILMS INCORPORATED WITH CELLULOSE MICROCRYSTALS

Cristiane K. Santin, Universidade do Vale dos Sinos [(1)]
Thais Henz Paim de Almeida, Universidade do Vale dos Sinos [(2)]

ABSTRACT

Due to the environmental impacts caused by the indiscriminate use and improper disposal of plastics, the development of packaging with biodegradable potential has attracted research in both academic and industrial settings. In this context, chitosan has been widely investigated as a substrate for producing biofilms and polymer blends with bioactive characteristics, but it has poor mechanical properties that can be improved with the addition of reinforcing additives. In this approach, cellulose is a naturally occurring, low-cost, abundant raw material with interesting properties and easy functionalization. In this study, cellulose microcrystals (MCCs) were extracted from grape pomace and used as a reinforcing agent in the production of chitosan-based films. The films exhibited a homogeneous appearance, smooth texture, and handling resistance. The results indicated that the addition of MCCs made films less susceptible to moisture, an important and desirable property in packaging manufacturing.

Keywords: "cellulose microcrystals", "grape pomace", "chitosan", "packaging"

1. INTRODUÇÂO

A indústria de alimentos é o maior consumidor mundial de embalagens, sendo os plásticos os substratos mais usados para tal. Visando contribuir com o equilíbrio ecológico mundial, este setor tem sido instigado a diversificar e encontrar alternativas mais sustentáveis. Diversas tecnologias têm surgido a fim de diminuir problemas ambientais, como a utilização de embalagens biodegradáveis de fontes renováveis, e de aumentar a funcionalidade das embalagens, como em sistemas que interagem com o alimento, chamados de embalagens ou filmes ativos.

Neste trabalho, microcristais de celulose (MCCs) foram extraídos a partir do bagaço de uva, um rejeito agroindustrial oriundo do processo de produção de suco, e utilizados como agente de reforço em filmes a base de quitosana. O percentual de celulose extraída a partir do bagaço da uva obtido foi de 6,47%, enquanto o da obtenção de microcristais foi de 42,73%, ambos base seca. Os biofilmes de quitosana contendo MCCs foram preparados pelo método *casting* e incorporados com 5%, 10% e 15% (v/v) de MCCs, posteriormente, os filmes foram caracterizados quanto à capacidade de absorção de água, textura, opacidade e dureza. Os resultados obtidos evidenciaram uma aparência opaca, porém homogênea para os filmes, textura lisa, resistência ao manuseio, e menos suscetíveis à ação da umidade.

2. MATERIAIS E METODOS

Os bagaços de uva foram doados pela empresa TECNOVIN DO BRASIL, de Bento Gonçalves-RS, sendo proveniente do processamento de suco. Logo após a coleta, o resíduo foi armazenado em freezer a -18ºC. Antes da utilização, as amostras de bagaço foram submetidas ao processo de secagem em estufa com circulação de ar por 18 horas a temperatura de 70ºC. Após

a secagem, as amostras foram trituradas em moinho de facas e acondicionadas em dessecadores.

A extração da celulose do bagaço de uva foi realizada de acordo com metodologias descritas por COELHO et al. [1] e LU & HSIEH [2] com algumas modificações, e que consistem em quatro tratamentos principais: com etanol, ácido, básico e branqueamento. Inicialmente, o bagaço de uva triturado foi peneirado até obtenção de uma granulometria de 425 mm em peneira de 35 *mesh*. Após, 50g do material foram tratados com 750 mL de álcool etílico 95% PA (Anidrol, Brasil), sob agitação, a 75ºC por 3 horas, para remoção de ceras, fenólicos, pigmentos e óleos. O segundo tratamento foi com 1000 mL de uma solução de H_2SO_4 2% (v/v) a 80ºC por 5 horas, para hidrolisar polissacarídeos e polifenóis. O terceiro tratamento foi realizado com 750 mL de uma solução de NaOH 5% (m/v) a 90ºC por 5 horas, para dissolver lignina, hemicelulose remanescente e outros polissacarídeos. Por último foi feito branqueamento com 250 mL de solução de H_2O_2 5% (v/v), ajustado para o pH 11 com NaOH, a 50ºC por 8 horas, seguido de 15 horas a temperatura ambiente (aproximadamente 20ºC) para oxidar e dissolver lignina e fenólicos remanescentes.

A polpa celulósica resultante foi congelada e depois liofilizada em liofilizador L108 por 72 horas. Para obtenção dos microcristais de celulose (MCCs), a polpa celulósica foi hidrolisada com solução de ácido sulfúrico 65% (v/v) na proporção de 1:20 (m/v), sob agitação constante, a temperatura de 45ºC por 1 hora. A solução foi centrifugada a 7000 rpm por 25 minutos a 20ºC e lavada para remoção do ácido sulfúrico. Após quatro centrifugações, obteve-se uma suspensão coloidal. A suspensão de NCCs/MCCs foi dialisada até pH 6 e, em seguida, homogeneizadas com ultrassom

Para a obtenção dos filmes utilizou-se quitosana comercial (Polymar e Nutrição S/A, Brasil), com grau de desacetilação de 86,3% e densidade de 0,32 g/mL. As soluções filmogênicas foram preparadas dissolvendo-se quitosana em pó (2%, m/v) em solução de ácido acético 2% (v/v). Após, a suspensão de microcristais de celulose foi adicionada a cada solução (5, 10 e 20%, v/v), e deixou-se uma para controle (0%, v/v). A quantidade de microcristais utilizada foi calculada a partir da concentração da solução inicial de 5 $g.L^{-1}$.

As análises dos filmes quanto à absorção de água, espessura, opacidade e dureza foram realizadas no Laboratório de Engenharia de Alimentos. Já a preparação das amostras para Microscopia Eletrônica de Varredura foi realizada no Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais (LCVMat), e a respectiva análise no Instituto Tecnológico em Ensaios e Segurança Funcional (itt Fuse). A Espectroscopia por Refletância Total Atenuada no Infravermelho com Transformada de Fourier (ATR-FTIR) foi realizada no Laboratório de Biologia Molecular e Toxicologia. Todos os laboratórios utilizados situam-se na Universidade do Vale do Rio dos Sinos.

3. RESULTADOS e DISCUSSOES

O processo de extração da celulose a partir do bagaço de uva foi realizado através de 4 etapas principais contemplando tratamento com etanol, ácido sulfúrico (H_2SO_4) a 2% (v/v), hidróxido de sódio (NaOH) 5% (m/v) e branqueamento com peróxido de hidrogênio (H_2O_2) 5% (v/v). Após a última etapa verificou-se que a amostra apresentava coloração com diversos pontos escuros, Figura 1(a), de forma que se repetiu o branqueamento com H_2O_2 por duas vezes, porém, com aplicação de maior temperatura, 65ºC, e menor tempo seguida de liofilização, Figura 1(b).

Figura 1. Polpa celulósica obtida após uma etapa de branqueamento (a); Celulose liofilizada extraída do bagaço de uva (b)

(a)

(b)

O rendimento obtido da extração da celulose a partir do bagaço de uva foi de 6,47% (m/m). Para obtenção dos microcristais, a celulose liofilizada (Figura 1 (b) foi reduzida e submetida a hidrólise com ácido sulfúrico 65% (v/v). Ao final de todo o processo, obteve-se uma solução coloidal, na qual, conforme descrito por BOSCHETTI [3], infere-se que há nanocristais de celulose em suspensão e microcristais precipitados. A partir da massa inicial de celulose (base seca) submetida ao tratamento com ácido sulfúrico 65% (v/v) e a massa de microcristais de celulose obtida após a liofilização, calculou-se o rendimento dos MCCs, obtendo-se o valor de 42,73% (m/m), valor superior aos encontrados por COELHO et al. [1] e JIANG E HSIEH [2]. Sabe-se que a concentração e o tipo de ácido influenciam a obtenção dos nanocristais e microcristais, porém, condições como tempo e temperatura reacional tambem influenciam-no processo de hidrolise.

Em relação ao aspecto visual dos filmes desenvolvidos, a Figura 2(a) apresenta o filme com 20% de MCCs produzido na primeira batelada, e o produzido na segunda batelada Figura 2(b)

Figura 2. Filme de quitosana com 20% de MCCs produzido na primeira batelada (a) e na segunda batelada (b).

(a)

(b)

Os filmes obtidos na primeira batelada apresentaram-se mais heterogêneos e com a presença de microbolhas em relação aos da segunda batelada, provavelmente resultantes do aquecimento das soluções filmogênicas. Para minimizar tal comportamento, os filmes foram homogeneizados com dispersador e centrifugados obtendo-se, então, filmes mais homogêneos e com textura mais lisa, independentemente da quantidade de microcelulose adicionada. Ainda, os filmes desenvolvidos mostraram-se resistentes ao manuseio, podendo ser esticados sem romper facilmente, com boa maleabilidade e a devida aderência dos microcristais à matriz polimérica

A intensidade de coloração foi quantificada através da análise de opacidade dos filmes, calculada pela absorbância (A) medida em espectrofotômetro em razão da espessura de cada amostra (mm), conforme resultados da Tabela 1.

Tabela 1: Opacidade dos filmes

Filme	Opacidade (A mm^{-1})	
	300 nm	600 nm
QT	$26,41^{a} \pm 3,27$	$1,89^{a} \pm 0,37$
QN5	$21,84^{a} \pm 4,54$	$1,38^{ab} \pm 0,14$
QN10	$24,12^{a} \pm 4,30$	$1,75^{ab} \pm 0,17$
QN20	$25,14^{a} \pm 7,62$	$1,99^{a} \pm 0,34$
Q1-20	$28,67^{a} \pm 0,00$	$1,11^{b} \pm 0,12$

QT: quitosana pura; QN5, QN10 e QN20: filmes de quitosana com 5%, 10% e 20% de MCCs, respectivamente; Q1-20: quitosana com 20% MCCs s/ centrifugação. Médias com letras iguais, na mesma coluna, não diferem ao nível de 5% de significância pelo Teste de Tukey**.**

Os valores de absorbância obtidos na região do visível (600 nm) indicam que, de forma geral, todos os filmes apresentaram baixa opacidade e alta transparência. Apesar das pequenas diferenças entre os resultados, os filmes produzidos com homogeneização e centrifugação se mostraram iguais ao nível de 5% de significância. Quanto aos resultados observados na região do ultravioleta (300 nm), todos os filmes apresentaram valores iguais entre si ($p>0,05$), indicando que a adição dos microcristais não afetou a absorção dos filmes nesse comprimento.

O controle da espessura é um aspecto muito importante para garantir uma adequada uniformidade e repetitividade das medidas das propriedades dos filmes. Os resultados mostram que os filmes preparados com centrifugação apresentaram homogeneidade entre si, com espessura média estatisticamente igual ($p>0,05$), variando entre 0,0454 mm e 0,0596 mm. Somente o filme com 20% de MCCs preparado na primeira batelada apresentou espessura média superior às demais (0,1186 mm). Este aspecto reitera o que foi observado na análise de opacidade e visualmente, de que o processo de remoção das impurezas é relevante para a homogeneidade dos filmes.

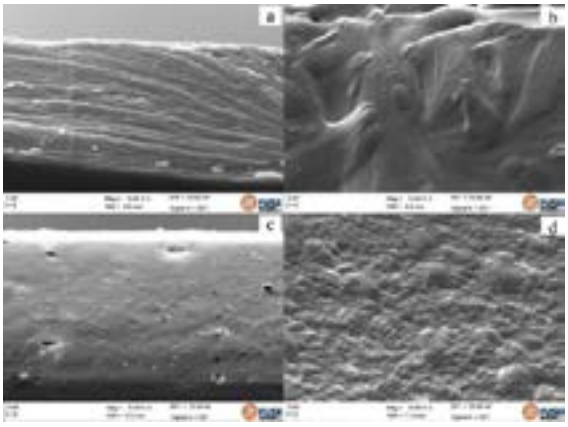
Resultados quanto a absorção de água (*swelling*) demonstraram uma diminuição com o aumento da concentração de MCCs, cujo menor valor foi evidenciado para o filme com 20% de MCCs preparado com centrifugação (61,32%). Este resultado pode indicar uma boa interação da quitosana com a fase de reforço, de forma que os MCCs impediram que as moléculas de água se

ligassem à estrutura da matriz. Estudos de MOUDOOD et al. [4] relatam que o volume de água absorvido pela celulose diminui quando a taxa de cristalinidade aumenta e que a difusão de umidade na celulose ocorre, principalmente, na fase amorfa. Assim, os resultados de absorção de água evidenciados sugerem que os microcristais de celulose desenvolvidos possuem alta cristalinidade.

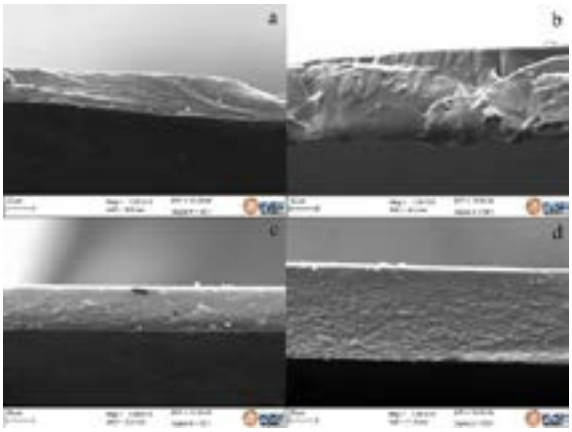
A análise por FTIR indicou a presença de banda mais largas nas regiões entre 3100-3400 cm^{-1} atribuídas à vibração do grupo -OH da água adsorvida. Foram verificadas bandas nas regiões de 2900-2800 cm^{-1}, atribuídas a vibração de estiramento C-H [5]. Ainda, segundo CHAGAS [6], o pico observado em 1640 cm^{-1} corresponde ao estiramento do grupo carbonila C=O, e o pico próximo a 1550 cm^{-1} relaciona-se aos estiramentos NH_2. Estas são as bandas típicas da quitosana, oriundas de quitina residual, proveniente do processo de desacetilação. Ainda, observou-se bandas em torno de 1000 cm^{-1} as quais correspondem à vibração axial da ligação C-O e uma banda a 897 cm^{-1} indicando a deformação axial das ligações C-O-C e ligações β-glicosídicas presentes entre as unidades de glicose da celulose [7].

A morfologia os filmes de quitosana com diferentes concentrações de microcristais de celulose foi observada através da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Figura 3.

Figura 3: Micrografias (I) da superfície dos filmes. (II) parte interna. Filme de quitosana pura (a); filme c/ 5% de MCC(b); filme c/ 10% de MCCs (c); filme c/ 20% de MCCs (d).



(I) superfície



(II) parte interna

O filme com 5% de MCCs aparenta ter relevo mais irregular. Já os filmes de quitosana pura (Fig.3a), de quitosana com adição de 10% de MCCs (Fig.3c) e de 20% de MCCs (Fig.3d) contêm algumas partículas sólidas residuais, que possivelmente são provenientes da quitosana, que não foi totalmente dissolvida. O filme incorporado com 20% de MCCs também apresenta mais rugosidades tanto na superfície quanto na estrutura interna. Pequenas fissuras podem ser visualizadas na superfície do filme de quitosana com adição de 10% de MCCs. As imagens indicam que houve boa interação entre a fase de reforço e a matriz polimérica, sem formação de aglomerados. Além disso, pode-se concluir que diferentes concentrações de microcristais influenciam diretamente a morfologia dos filmes.

Com relação a rigidez da matriz, observada através do teste de dureza, as amostras apresentaram valores que variaram entre 48,4 e 56. De acordo com o teste de Tukey, ao nível de 5% de significância, pode-se afirmar que os filmes apresentaram a mesma dureza. Portanto, a adição de microcristais de celulose como agente de reforço não influenciaram na referida propriedade.

4. CONCLUSOES

O estudo apresentado avaliou a extração de microcristais de celulose a partir da celulose do bagaço de uva e a sua aplicação como agente de reforço em filmes a base de quitosana. Os tratamentos realizados no processo de extração da celulose do bagaço de uva foram efetivos, com remoção dos compostos não celulósicos, resultando num produto de coloração clara e homogênea. A obtenção dos microcristais utilizando hidrólise ácida se mostrou satisfatória, apresentando rendimento de 42,73% (m/m). Todavia, algumas variáveis do processo precisam ser mais estudadas, pois influenciam diretamente as características dos microcristais obtidos, tais como rendimento, cristalinidade e morfologia. Os filmes se mostraram visualmente uniformes, com flexibilidade e resistência. As análises de opacidade e absorção de água indicaram que a adição do agente de reforço possui efeito positivo nas propriedades dos filmes. Entretanto, para o ensaio de dureza não se observou diferença significativa ($p>0,05$) entre os filmes, demonstrando a necessidade de análises adicionais para avaliação das propriedades mecânicas.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos aos Laboratórios da Universidade do Vale do Rio dos Sinos e ao Instituto Tecnológico em Ensaios e Segurança Funcional, ittFuse _Unisinos pelas análises realizadas.

REFERÊNCIAS

[1] COELHO, C. C. S.; SILVA, R. B. S.; CARVALHO, C. W. P.; ROSSI, A. L.; TEIXEIRA, J. A.; FREITAS-SILVA, O.; CABRAL, L. M. C. *Cellulose nanocrystals from grape pomace and their use for the development of starch-based nanocomposite films.* International Journal of Biological Macromolecules, v. 159, p. 1048–1061, 2020.

[2] LU, P.; HSIEH, Y. *Cellulose isolation and core–shell nanostructures of cellulose nanocrystals from chardonnay grape skins.* Carbohydrate Polymers, v. 87, p. 2546– 2553, 2012

[3] BOSCHETTI, W. T. N. *Produção e caracterização de nanocristais e microcristais de celulose e sua aplicação em adesivos de ureia-formaldeído.* Tese (Doutorado em Ciência Florestal). Universidade Federal de Viçosa, 2017.

[4] MOUDOOD, A.; Rahman, A.; Khanlou, H. M.; Hall, W.; Öchsner, A.; Francucci, G. *Environmental effects on the durability and the mechanical performance of flax fiber/bio-epoxy composites.* Composites Part B: Engineering, v. 171, n. May, p. 284–293, 2019.

[5] ABRAS, C. M. *Utilização de quitosana, celulose nanofibrilada e óleo essencial de gengibre (Zingiber Officinale L.) para o desenvolvimento de filmes nanocompósitos.* Dissertação (Mestrado em Agroquímica). Universidade Federal de Lavras, 2018.

[6] CHAGAS, J. A. O. *Membranas de quitosana com glicerol para aplicação em tratamento de águas residuais*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2017

[7] MARADINI, G. S. *Nanocristais de celulose como reforço eficiente em compósitos poliméricos utilizando monômero de estireno como agente compatibilizante.* Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal do Espírito Santo, 2020.

44º SENAFOR

28th International Forging Conference
13th International Sheet Metal Forming Conference / 10th BrDDRG Congress
13th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies – Brazil/RS
2nd International Conference on Innovation in Materials and Manufacturing
Hotel Plaza São Rafael – P. Alegre RS, October 2-4, 2024

AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE SUPERFÍCIE DE FILMES DE POLIPROPILENO BIORIENTADO APÓS TRATAMENTO POR CHAMA

Luan S. Silveira [1]
Jéssica P. Pires [2]
Marçal J. R. Pires [1]
Rosane A. Ligabue [1]

RESUMO

Filmes de polipropileno biorientado (BOPP) têm sido amplamente utilizados na indústria de embalagens flexíveis devido à sua excelente resistência mecânica, transparência e propriedades de barreira. Além disso, técnicas de modificação superficial são empregadas para melhorar propriedades como a molhabilidade e a adesão da superfície dos filmes, favorecendo a aplicação de tintas, revestimentos e adesivos. Uma das técnicas mais comumente utilizadas é o tratamento por chama, que consiste em expor a superfície do filme a uma chama oxidante controlada, promovendo a oxidação superficial por meio da ativação térmica de espécies contendo oxigênio. Nesse contexto, este estudo investigou o efeito do tratamento por chama nas propriedades superficiais de filmes multicamadas de BOPP em escala industrial, comparando os lados tratado e não tratado dos filmes. Os parâmetros avaliados incluíram ângulo de contato (θ) e coeficiente de atrito (COF). Os resultados mostraram uma redução significativa no ângulo de contato para as superfícies tratadas (θ ≈ 42°) em comparação às superfícies não tratadas (θ ≈ 91°), indicando maior molhabilidade. O COF variou de 0,51 a 0,44 para superfícies não tratadas após 24 horas da produção e de 0,28 a 0,25 para superfícies tratadas. O tratamento por chama melhorou a característica de molhabilidade da superfície dos filmes de BOPP tratados, além de reduzir seu COF, melhorando as propriedades superficiais para a aplicação de produtos de revestimento.

Palavras-chave — BOPP, COF, Ângulo de contato, Embalagem.

ABSTRACT

Biaxially oriented polypropylene (BOPP) films have been widely used in the flexible packaging industry due to their excellent mechanical strength, transparency, and barrier properties. Additionally, surface modification techniques are employed to improve properties such as wettability and adhesion of the films surface for the application of inks, coatings, and adhesives. One of the most used techniques is flame treatment, which involves exposing the film surface to a controlled oxidizing flame, promoting surface oxidation through the thermal activation of oxygen-containing species. In this context, this study investigated the effect of flame treatment on the surface properties of industrial-scale BOPP multilayer films by comparing the treated and untreated sides of the films. The evaluated parameters included contact angle (θ) and coefficient of friction (COF). The results showed a significant decrease in contact angle for treated surfaces (θ ≈ 42°) compared to untreated surfaces (θ ≈ 91°), indicating improved wettability. The COF varied from 0.51 to 0.44 for untreated surfaces after 24 hours of production and from 0.28 to 0.25 for treated surfaces. Flame treatment improved the wettability characteristic of the treated BOPP films surface, as well as decreased its COF, improving the surface properties for the application of coating products.

Key words — BOPP, COF, Contact angle, Packing.

1. INTRODUÇÃO

O filme de BOPP (polipropileno biorientado) se destaca como um material versátil, tendo em vista ser utilizado para diversas aplicações, como fitas adesivas e etiquetas, até embalagens flexíveis para alimentos e produtos farmacêuticos. As características desejadas de barreira, selagem, resistência, flexibilidade, transparência e capacidade de impressão podem ser alcançadas a partir de diferentes formulações de matérias-primas e condições de processo [1, 2].

Filmes de BOPP são produzidos através do processamento do polipropileno por meio de um processo que envolve extrusão e estiramento. Um estiramento no sentido longitudinal e outro no sentido transversal, em relação à extrusão, são aplicados conferindo características distintas ao filme. Sua estrutura é composta por duas camadas externas, podendo ser constituído por camadas intermediarias, ambas formadas por polímeros, copolímeros e aditivos, e uma camada interna que contém homopolímeros e material reciclado. Os aditivos desempenham um papel fundamental na obtenção das propriedades específicas do filme, ajustando suas características conforme as necessidades da aplicação e os requisitos do cliente [3].

Propriedades de superfície desempenham um papel importante na performance de materiais. Molhabilidade e adesão estão entre as propriedades mais solicitadas em diversos tipos de indústrias, visando aplicações de revestimentos, adesivos e tintas. Para que as superfícies sejam capazes de suportar processos de impressão e revestimento, são utilizadas diferentes estratégias de processamento como tratamentos plasma, corona, laser e chama. O tratamento por chama, em conjunto com a descarga corona, são os tratamentos mais utilizados para a ativação da superfície de substratos poliolefínicos. [4].

O tratamento por chama consiste em expor a superfície do filme a uma chama oxidante controlada, promovendo a oxidação da superfície através da ativação térmica de espécies contendo oxigênio [3,5]. O presente estudo tem como objetivo avaliar as propriedades de superfície em filme de polipropileno biorientado multicamada produzido em escala industrial na empresa Polo Films Indústria e Comércio S/A após realizado tratamento por chama, comparando superfície tratada e não tratada através de análise dos parâmetros: coeficiente de atrito e ângulo de contato.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Filme de BOPP

Para o desenvolvimento deste estudo, foi selecionado como amostra um filme de BOPP laminado multicamada produzido pela empresa Polo Films Indústria e Comércio S/A, sendo utilizado o tratamento superficial por chama durante sua produção.

2.2. Avaliação do coeficiente de atrito

A fim de verificar a influência do tratamento superficial em propriedades de superfície, foi acompanhado a variação dos valores de coeficiente de atrito (COF). Esta avaliação foi realizada na empresa Polo Films Indústria e Comércio S/A, seguindo a norma ASTM D 1894, utilizando equipamento da empresa Testing Machines Inc. (TMI), obtendo-se os valores de COF estático e dinâmico. A análise de COF foi feita avaliando tanto o lado tratado (T), quanto o lado não tratado (NT), em triplicata e em diferentes dias, sendo calculado a média dos valores obtidos. Esta análise consiste em colocar em contato duas superfícies do filme, T com T e NT com NT, aonde uma amostra se mantem estática no equipamento, enquanto outra se move deslizando longitudinalmente sob a amostra, gerando assim a medida de atrito entre as duas superfícies. Na prática, a

indústria de embalagens flexíveis considera o valor do coeficiente estático como sendo de baixa relevância na maioria dos casos (por convenção, para valores de COF dinâmico de até 0,35), sendo assim, por se tratar de um tipo de filme que possui COF dinâmico abaixo deste valor, os resultados de COF estático não são relevantes para o desempenho do filme, não sendo considerados.

2.3. Avaliação do ângulo de contato

A medida do ângulo de contato do filme foi realizada no Laboratório de Espectroscopia da Escola Politécnica da PUCRS com um equipamento Phoenix 300 da empresa SEO, software Surfaceware 9. A análise consiste em pingar uma gota de água deionizada sobre a superfície da amostra através de uma seringa. Como mostra Figura 1, imagem obtida da gota sobre a superfície através do software para leitura dos dados, é capturada por uma câmera do equipamento. As medidas dos ângulos esquerdo e direito da gota são obtidas, além do valor de ângulo médio.

Figura 1: Imagem da gota de água formada sobre a superfície do filme de BOPP.

Para que se obtivesse uma maior homogeneidade em relação a amostra e assim uma maior confiabilidade dos dados, foram feitas amostragem de regiões diferentes do filme como mostra Figura 2. Em cada amostra, foi feito a leitura de duas gotas. Todas as medidas foram feitas após 1 segundo da gota depositada sobre o filme, obtendo-se assim uma média dos valores de ângulo médio de cada gota, em cada superfície.

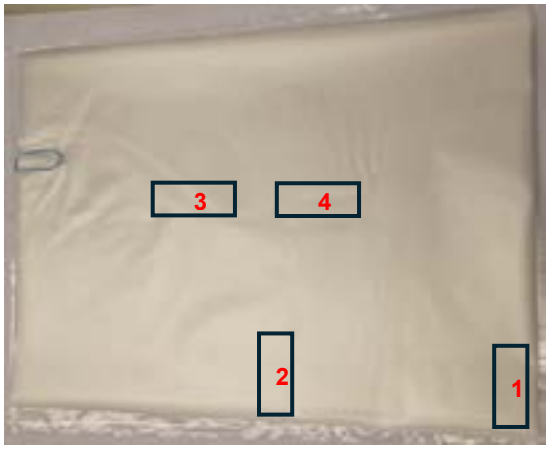


Figura 2: Regiões de amostragem 1, 2, 3 e 4 dos filmes de BOPP para medida do ângulo de contato.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Avaliação do coeficiente de atrito e ângulo de contato

A Tabela 1 apresenta os valores médios de COF e de ângulo de contato obtidos. As análises foram realizadas em relação a data em que o filme foi produzido e apresentados em dias, sendo assim, na coluna “Tempo após produção do filme” os valores referentes a “0” representam que a análise foi realizada no dia em que o filme foi produzido, e assim sucessivamente. Os valores estão em formato de média, sendo o teste feito em triplicata para avaliação de coeficiente de atrito. Para ângulo de contato, foram feitas amostragens em 4 regiões diferentes do filme, obtendo 2 valores de ângulo médio em cada amostra, sendo assim, foi realizado o cálculo de média de 8 valores.

Tabela 1: Valores de COF e de ângulo de contato para os filmes de BOPP não tratado (NT) e após tratamento por chama (T)

	COF		**Ângulo de contato (°)**	
Tempo após produção do filme (dias)	**NT**	**T**	**NT**	**T**
0	0,51	0,28	-	-
1	0,44	0,25	-	-
7	-	-	91	42
57	-	-	80	36

Os resultados mostrados na Tabela 1 para o COF são de 0,51 ± 0,005 e 0,28 ± 0,009, respectivamente, para o filme NT e o filme T logo após a produção do filme. Após 1 dia, os valores tiveram um pequeno decréscimo de 0,44 ± 0,009 e 0,25 ± 0,008, respectivamente para os filmes NT e T. Estes valores demonstram uma redução no coeficiente de atrito apresentado na amostra, tanto em comparação com a superfície tratada e não tratada, quanto uma redução em relação ao passar do dia, indicando uma melhora na processabilidade e aplicação de revestimentos no material. A redução e estabilização do COF contribuem para a melhora da processabilidade dos filmes de BOPP, uma vez que evitam falhas como rugas, rompimentos e instabilidade durante as etapas de impressão, laminação, corte e soldagem, comuns em filmes com COF elevado ou excessivamente baixo. Além disso, a manutenção de valores adequados garante maior uniformidade no deslocamento do filme em altas velocidades, reduzindo rejeições e perdas no processo produtivo. Essa condição também favorece a aplicação de revestimentos e adesivos, pois proporciona maior controle no manuseio do filme e contato mais eficiente com as superfícies, resultando em embalagens flexíveis de melhor desempenho e qualidade [6].

Os valores de ângulo de contato são muito diferentes para a superfície tratada por chama (θ = 42° ± 3 e 36° ± 1, após 7 e 57 dias, respectivamente) em relação a superfície não tratada (θ = 91° ± 3 e 80° ± 3, após 7 e 57 dias, respectivamente), indicando uma melhora na molhabilidade da superfície tratada do filme, e consequente, melhor o trabalho de adesão da superfície [7]. Também foi possível observar que ocorre uma diminuição no valor do ângulo de contato, em ambas as superfícies NT e T, indicando que pode haver uma mudança na composição inicial das superfícies do filme, possivelmente, por migração de alguns aditivos [8].

4. CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos nas análises de coeficiente de atrito e ângulo de contato, foi possível avaliar a influência do tratamento superficial por chama nas

propriedades de superfície em filme de BOPP multicamada após tratamento chama ao comparar superfície tratada e não tratada. Foi possível identificar uma melhora na molhabilidade do filme a partir de redução do ângulo de contato através do tempo em comparação com a superfície que sofreu tratamento superficial e com aquela que não foi tratada, de mesmo modo que melhor processabilidade e aplicação de revestimentos através da avaliação de redução de coeficiente de atrito.

REFERÊNCIAS

[1] SANTOS, F. J.; SILVA, M. O.; SILVA, J. C. Processo de Produção do Filme BOPP: Uma análise detalhada das etapas de produção do filme BOPP, desde a extrusão até o acabamento final. São Paulo: Blucher, 2014. 200 p.

[2] GUAELI JR, C. A. Análise reológica e impacto ambiental do reprocessamento de filme bopp com copolimero randômico de propeno e eteno para embalagens alimentícias. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia em Polímeros) - Faculdade de Tecnologia José Crespo Gonzales, 2023.

[3] CARVALHO, L. B. Produção de polipropileno bi-orientado (BOPP): Tecnologia e Aplicações. Bragança. Diss. de Mestrado. Engenharia Química, Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Bragança, Instituto Politécnico de Bragança, 2008.

[4] FARRIS, S. et al. The fundamentals of flame treatment for the surface activation of polyolefin polymers - A review. Polymer, 3591- 3605 (2010) 51 (16).

[5] WILLIAMS, D. F. et al. Flame treatment of polypropylene: A study by electron and ion spectroscopies. International Journal of Adhesion and Adhesives, 26-33 (2015) 63.

[6] MARTINS, A. M. Estudo da influência da erucamida, do glicerol monoestearato e do aumento de temperatura no coeficiente de atrito (COF) de filmes plásticos ao longo do tempo. Diss. de Mestrado. Ciência e Tecnologia de Alimentos, Instituto de Tecnologia de Alimentos, 2020.

[7] BERNARDI, C. et al. Chemical surface treatment mechanisms involved in a flamed polypropylene/polyurethane bonded interface: Toward a treatment by nitrogen plasma. Applied Surface Science, 153475 (2022) 593.

[8] KNACK, E. R. Estudo da migração de deslizante em filmes de polietileno. Diss. de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais, UFRGS, 2016.