



V CONGRESSO 2025 PPGMEC

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

PPGMEC

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

EMC

ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA,
MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO



UFG

UNIVERSIDADE
FEDERAL DE GOIÁS

**Anais do V PPGMEC-2025 - V Congresso do Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica da Universidade Federal de Goiás (UFG). Goiânia, Goiás, 03-05 de dezembro de 2025**

Copyright©2026 by Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Goiás

ISBN (impresso/e-book): 978-85-94498-40-3

Organizador: João Paulo da Silva Fonseca

Revisores: Demostenes Ferreira Filho, Daniel Fernandes da Cunha, Daniel Souza, Joao Paulo da Silva Fonseca, Fernanda Christina Teotonio Dias Troysi, Gino Bertollucci Colherinhas, Marlipe Garcia Fagundes Neto, Anderson Gomes Girardi, Diogo Appel Colvero, João Bosco Da Cunha, Renata Rodrigues Alves, Thales Marcelo Pereira Rodrigues, Gustavo de Castro Lopes, Andreia Aoyagui Nascimento, Felipe Pamplona Mariano, Amanda Albertin Xavier da Silva, Almério José Venâncio Pains Soares Pamplona, Douglas Neves Nascentes, Fernanda dos Santos Silva, Júlio Modesto Beghelli, Lucas Lauriano da Silva, Lucas Marques Monteiro, Mylena Carvalho Silva, Vitoria Ferreira de Oliveira Marques, Wesley da Silva Alves, Sigeo Kitatani Junior.

Editores: João Paulo da Silva Fonseca, Henrique Moura Martins

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação –CIP

F72 FONSECA, João Paulo da Silva.
Anais do V PPGMEC-2025 - V Congresso do Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica da Universidade Federal de Goiás.
Goiânia, Ed., 2026. E-book, in color, 284.
ISBN (impresso): 978-85-94498-40-3
1.Engenharia. 2. Mecânica 3. Física Aplicada

CDU: 621.3, 621.38, 530

Índice para catálogo sistemático: CDD 620, 530

DIREITOS RESERVADOS aos Organizadores desta obra: É proibida a reprodução total ou parcial da obra, de qualquer forma ou por qualquer meio, sem a autorização prévia e por escrito do autor. A violação dos Direitos Autorais (Lei nº 9.610/98) é crime estabelecido pelo artigo 184 do Código Penal.

DataSci Editora®

London Sim Gestão de Documentos Ltda

Prefixo Editorial: 67929 - contato@london7.com.br, www.datasci.com.br

Goiânia, 2026



Sinopse

Esta é a publicação dos Anais do 5º Congresso do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Goiás. Vinte e seis textos com diferentes abordagens compõem os Anais. O evento contou com a participação de 108 inscritos (número 104% superior ao registrado durante a quarta edição) e 26 artigos científicos apresentados em sessões técnicas, fortalecendo um dos principais objetivos traçados desde a primeira edição do congresso, que é aumentar a interação entre os discentes do programa, estudantes de graduação que desenvolvem trabalhos de iniciação científica, pesquisadores de outras unidades da UFG e instituições externas à UFG, bem como facilitar a divulgação dos trabalhos em andamento entre os diferentes grupos de pesquisa, potencializando a disseminação dos conhecimentos que estão sendo desenvolvidos no âmbito das Ciências Mecânicas na região de Goiânia, GO.

Apresentação

O 5º Congresso do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Goiás (PPGMEC/UFG) consolida este evento dentro de uma agenda anual, oportunizando aos participantes um momento propício para divulgação e discussão a respeito das pesquisas em desenvolvimento e tendências futuras no âmbito da Engenharia Mecânica. Em 2025, comemoramos 5 anos do PPGMEC e a 5ª edição do nosso Congresso, reafirmando nosso compromisso com a engenharia, inovação e pesquisa. Ao longo desses anos, construiu-se uma jornada de conexões, conhecimentos e impacto na Engenharia Mecânica, conectando pessoas e promovendo a troca de ideias para um futuro mais sustentável e tecnológico.

Com a temática contemporânea e inovadora da Indústria 5.0 e Engenharia: Conectando Pessoas, Inovação e Sustentabilidade, os congressistas tiveram a oportunidade de apresentar suas pesquisas, discutir resultados e metodologias com outros participantes, ouvir palestrantes experientes e renomados no Brasil e no exterior, desenvolver suas habilidades em minicursos pensados especificamente para o perfil dos graduandos e pós-graduandos em engenharia da UFG e de Goiás, além de fortalecer suas vivências com a pesquisa científica, tecnológica e de inovação, expandindo suas fronteiras do conhecimento e seu networking para eventuais parcerias no futuro. Esta quinta edição contou com a participação de 108 inscritos e cinco conferencistas convidados, sendo três provenientes de empresas ou universidades localizadas fora do Brasil, consolidando o aspecto de internacionalização do evento.

As instituições de origem dos palestrantes foram diversas além de técnica e culturalmente enriquecedoras, partindo da Secretaria de Inclusão da Universidade Federal de Goiás, em Goiânia-GO, da Superintendência da Polícia Científica de Goiás, em Goiânia-GO, até ultrapassar fronteiras e alcançar o Instituto de Engenharia e Gestão Grenoble INP, da Universidade Grenoble Alpes, na França; a AMP Smart Sortation™, Operações Europeias, na Holanda; e a Ford Motor Company, nos Estados Unidos.

Além das sessões técnicas, nas quais foram apresentados 26 artigos científicos, os congressistas tiveram a grata oportunidade de acompanhar cinco palestras com temáticas contemporâneas e fundamentais: “Neurodiversidade no Ensino Superior”, proferida pela Profª. Drª. Ana Claudia Antonio Maranhão Sá (SIN-UFG); “Inovação para as pessoas e o desempenho industrial e social”, proferida pelo Prof. Dr. Guillaume Thomann (Grenoble INP-UGA, França); “Da prancheta à Indústria 5.0: Moldando o hoje e o amanhã da mobilidade e da sustentabilidade”, proferida pelo Engenheiro Me. Melzak Marques da Silva (Ford Motor Company, EUA); “Revolução da reciclagem: IA, automação e o caminho essencial para a sustentabilidade”,

proferida pelo Engenheiro e Gerente de Operações Tomás Lerbach (AMP Smart Sortation™, Holanda); e “O trabalhador como estratégia central na Indústria 5.0: Ergonomia visual e sustentabilidade humana no ambiente de produção”, proferida pela Perita Criminal Me. Katiany Rossi Lucas Cintra (SPTC-GO).

O evento também oportunizou um minicurso focado no desenvolvimento da pesquisa científica: “A importância do Resumo da Pesquisa”, ministrado pelo Prof^º. Dr. Guillaume Thomann (Grenoble INP-UGA, França) e, pela primeira vez, uma Feira de Exposição formada por parceiros do PPGMEC. A Feira de Exposição e Roda de Discussão contou com os seguintes parceiros: CERISE/UFG – Centro de Excelência em Redes Inteligentes sem Fio e Serviços Avançados; CIS.bc/UFG – Centro de Inovação Social do Brasil Central; SENAI ZEISS – Centro de Excelência em Metrologia; CEIA/UFG – Centro de Excelência em Inteligência Artificial; LabMic/UFG – Laboratório Multiusuário de Microscopia de Alta Resolução; Centro de Pesquisa em Manufatura Avançada – PPGMEC/UFG.

Após as apresentações iniciais, o espaço foi totalmente aberto para que todos pudessem circular, dialogar livremente, tirar dúvidas, explorar ideias e construir oportunidades de cooperação. Um momento dinâmico, interativo e altamente enriquecedor, muito elogiado pelos participantes. Por fim, a 5ª edição do Congresso do PPGMEC também foi palco do tradicional Seminário de Autoavaliação do PPGMEC, onde os grupos de trabalho se reuniram para compartilhar os resultados alcançados ao longo do ano de 2025 e diretrizes da CAPES para o quadriênio 2025-2028, com vistas ao planejamento estratégico do PPGMEC e preenchimento do Módulo Coleta da Plataforma Sucupira, cujas informações serão utilizadas pela CAPES durante o processo de Avaliação dos cursos/programas integrantes do Sistema Nacional de Pós-Graduação (SNPG).

A Comissão Organizadora agradece à comunidade que atendeu ao evento, contribuindo com trabalhos relevantes e de valioso conteúdo técnico e científico. Agradecemos à imprescindível contribuição dos revisores voluntários (em sua maioria egressos do próprio PPGMEC), os quais atenderam prontamente ao convite dessa comissão para avaliarem os trabalhos submetidos. Agradecemos aos voluntários discentes, cuja contribuição foi fundamental na operacionalização do evento, aos servidores Técnicos Administrativos que contribuíram de diversas formas para o sucesso do evento, em especial à secretaria da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação da UFG (EMC-UFG), e ao apoio institucional da Coordenação do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, da direção da EMC-UFG e da Pró-reitoria de Pós-Graduação.

Por fim, agradecemos copiosamente à FAPEG, à FUNAPE e à ADUFG pelos aportes financeiros concedidos, por meio de Editais públicos, para a realização deste evento. Tais contribuições foram fundamentais para a execução e sucesso do 5º Congresso do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da UFG.

Goiânia, dezembro de 2025.

Comissão Organizadora

Andre Contin

Demostenes Ferreira Filho

Diogo Appel Colvero

Eduardo Coelho dos Santos

Fernanda Christina Teotonio Dias Troysi

Frederico Rodrigues do Nascimento Junior

Hiago Silva Motta

Joao Paulo da Silva Fonseca

Lucca Castro Gonçalves de Mateus

Mauro Cesar da Silva

Paul Deniyi Oluwafemi

Índice

<i>ADEQUAÇÃO E MEDIÇÃO DA PERDA DE TRANSMISSÃO SONORA DE SILENCIADORES ACÚSTICOS PELO TUBO DE IMPEDÂNCIA DO LABMEC/UFG CONFORME A ASTM E2611-09</i>	9
<i>ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA DA MANUTENÇÃO CENTRADA NA CONFIABILIDADE</i>	19
<i>ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS OBTIDAS A PARTIR DO ENSAIO DE TRAÇÃO EM UM TUBO FABRICADO PELO PROCESSO COLD METAL TRANSFER</i>	29
<i>ANÁLISE DE ESTABILIDADE E ACURÁCIA DOS MÉTODOS θ EM EDOS</i>	40
<i>ANÁLISE EXPERIMENTAL DE UM TMD EM VIGAS SUBMETIDAS A ESCOAMENTO: INFLUÊNCIAS DA VELOCIDADE DO VENTO, MASSA E COMPRIMENTO DA RÉGUA</i>	50
<i>APLICAÇÃO DA MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO (MADA) COM INCONEL 625 EM AMBIENTES CORROSIVOS POR CLORO: UMA REVISÃO</i>	61
<i>ARQUITETURA NETWORK-IN-NETWORK OTIMIZADA COM INCEPTION PARA CLASSIFICAÇÃO MULTI-CLASSE DE IMAGENS ESPORTIVAS</i>	72
<i>AValiação DA INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA NO COMPORTAMENTO DINÂMICO DE UM MONOPILAR PARA TORRE EÓLICA DE 15 MW</i>	83
<i>AValiação EXPERIMENTAL DA PERDA DE TRANSMISSÃO EM SILENCIADORES COM TUBO PERFURADO E LÃ DE VIDRO</i>	93
<i>AValiação DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS OPERACIONAIS NA GEOMETRIA DE CORDÕES DE SOLDA GMAW COM INCONEL 625</i>	104
<i>CONSTRUÇÃO DE UM DISPOSITIVO JOMINY DE BAIXO CUSTO PARA ENSAIO DE TEMPERABILIDADE EM AÇOS</i>	117
<i>DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA PARA MONITORAMENTO E DETERMINAÇÃO DE VALORES DE GAP VARIÁVEIS EM PROCESSOS DE MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO (MADA)</i>	127
<i>DIGITALIZAÇÃO E CORRELAÇÃO DA IMAGEM OBTIDA PELA TÉCNICA DA FOTOELASTICIDADE COM AS TENSÕES EM MATERIAIS SUBMETIDOS À ESFORÇOS EM REGIME ELÁSTICO</i>	139
<i>DIMENSIONAMENTO DE UM MODELO DE VEÍCULO ELÉTRICO PARA ANÁLISE EXPERIMENTAL EM TÚNEL DE VENTO</i>	148
<i>DISPOSITIVO PARA POSICIONAMENTO AUTOMÁTICO DE ALIMENTAÇÃO EXTERNA PARA O PROCESSO DE MANUFATURA ADITIVA COM TOP TIG</i>	155
<i>ESTADO DA ARTE E ANÁLISE BIBLIOGRÁFICA SOBRE FUNDAÇÕES MONOESTACA APLICADAS A TURBINAS EÓLICAS OFFSHORE</i>	161
<i>ESTUDO EXPERIMENTAL DE LÃ DE VIDRO RECICLADA EM ATENUADORES SPLITTER DE GERADORES PELO MÉTODO DA SUPERFÍCIE ENVOLVENTE (ABNT ISO 8528-10)</i>	170

ESTUDO NUMÉRICO DE CONVECÇÃO FORÇADA EM CAVIDADE	182
METAMODELO DE KRIGAGEM PARA PREDIÇÃO E ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO COLAPSO DE PAINÉIS ENRIJECIDOS	192
MODELAGEM MATEMÁTICA DE FONTES DE CALOR EM PROCESSOS DE SOLDAGEM: UMA REVISÃO COMPARATIVA ENTRE ROSENTHAL, MODELOS GAUSSIANOS E GOLDAK	203
PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM TANQUE COM NÍVEL DE ÁGUA CONTROLADO PARA FABRICAÇÃO DE PEÇAS POR MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO À ARCO	212
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DE JATOS COMPRESSÍVEIS UTILIZANDO MÉTODO PSEUDOSPECTRAL DE FOURIER E SIMULAÇÃO DE GRANDES ESTRUTURAS	220
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SISTEMÁTICA DA UTILIZAÇÃO DE PLANEJADOR AUTOMÁTICO EM CONTROLADORES INDUSTRIAIS	230
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE A VIABILIDADE ESTRUTURAL DE VIGAS HÍBRIDAS USANDO MANUFATURA ADITIVA E ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS	241
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE MODOS DE DESGASTE EM LIGAS A BASE DE FeCrC	252
SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE CONVECÇÃO FORÇADA EM CAVIDADES QUADRADAS COM O USO DO SOFTWARE OPENFOAM®	262
UMA REVISÃO SOBRE TURBINAS EÓLICAS DE EIXO HORIZONTAL OFFSHORE	274



V CONGRESSO 2025 PPGMEC

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

ADEQUAÇÃO E MEDIÇÃO DA PERDA DE TRANSMISSÃO SONORA DE SILENCIADORES ACÚSTICOS PELO TUBO DE IMPEDÂNCIA DO LABMEC/UFG CONFORME A ASTM E2611-09

¹ Julia Maria S. de Assis, ¹ Marlipe G. Fagundes Neto

¹ Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e Computação, Universidade Federal de Goiás
Alameda Ingá, quadra B, bloco 5, s/n Chácaras California Endereço, 74045-155, Goiânia/ Goiás,
Brasil

julia_assis@discente.ufg.br, marlipe@ufg.br

DOI: 10.5281/zenodo.19040739

Resumo. A poluição sonora afeta os seres humanos, portanto é importante buscar por materiais acústicos que tornem os ambientes mais agradáveis, garantindo a saúde mental e física da população. O Laboratório de Mecânica Aplicada - Controle de Ruído e Acústica da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação da UFG possui o tubo de impedância, aparato para medição da transmissão sonora, que foi construído em 2017, mas ano após ano vem sendo aprimorado através de trabalhos de conclusão de curso e iniciações científicas e tecnológicas. Neste contexto, o objetivo deste trabalho é verificar a conformidade do tubo de impedância e das medições realizadas com a norma ASTM E 2611-09. A metodologia abrange leitura de trabalhos anteriores, artigos e fichas técnicas de tubos de impedância comerciais, construção de uma planilha comparativa, medições teste e pesquisa de soluções. O trabalho iniciou-se em janeiro de 2025 e dentro dos 33 itens listados na planilha comparativa o tubo de impedância cumpria com cinco itens, ou 15,16%, faltando 84,84% da listagem a ser regularizada. Os resultados atuais indicam que todos os itens estão sendo acatados. Dentre as modificações feitas para cumprir com a listagem estão troca de apoios frouxos resultando na melhora do manuseio e alinhamento, a calibração dos microfones por meio da matriz de transferência e ensaios com a fonte sonora ligada e desligada com o espécime estudado no lugar fixado. Assim, essa é uma forma de adequar o tubo para futuros testes e pesquisas científicas de novos insumos aplicados em projetos de tratamento acústico.

Palavras-chave: Tubo de impedância. ASTM E 2611-09. Transmissão sonora.

1 INTRODUÇÃO

A poluição sonora está entre os problemas de saúde pública segundo a OMS (Organização Mundial da Saúde). Como consequências da exposição a ruídos, o corpo humano pode manifestar reações de estresse, distúrbios de sono, doenças metabólicas e cardiovasculares, déficit cognitivo, problemas auditivos e obesidade, o excesso de ruído mantém o corpo em estado de alerta, comprometendo o descanso e a recuperação do organismo (OMS, 2018). Dessa forma, e por se tratar de uma questão de saúde pública, é notória a necessidade de buscar materiais que tenham bom desempenho no tratamento acústico para tornar os ambientes mais saudáveis do ponto de vista sonoro. Nesse contexto técnico, o tubo de impedância do LABMEC/UFG é um equipamento construído por discentes, técnicos e docentes da UFG (Universidade Federal de Goiás), localizado no prédio da Engenharia Mecânica no Campus Samambaia na cidade de Goiânia. Sua funcionalidade primordial é testar materiais apontando suas propriedades acústicas, dentre elas a impedância acústica, coeficientes de absorção e transmissão sonora.

Contudo, para maximizar sua aplicação e validade científica, busca-se adequar o tubo de impedância para a medição de perda de transmissão sonora segundo a norma ASTM E 2611-09. “A transmissão sonora ocorre quando uma onda sonora incide sobre uma barreira e parte da energia atravessa o material, propagando-se para o outro lado” (ROSSING, 2007, p. 120), ou seja, como uma energia sonora se comporta ao atravessar diferentes materiais. A transmissão sonora é um aspecto fundamental no estudo da acústica aplicada, especialmente em projetos de controle de ruído e isolamento sonoro em ambientes construídos. Portanto, trabalhar para regular o tubo de impedância do LABMEC/UFG justifica-se por disponibilizar um equipamento validado, essencial para futuras pesquisas em produtos capazes de amenizar a poluição sonora e contribuir diretamente para a saúde pública e a engenharia acústica.

2 METODOLOGIA

A primeira etapa do presente trabalho foi ler e estudar a norma ASTM E 2611-09, artigos sobre a temática, fichas técnicas de tubos de impedância comerciais e os trabalhos anteriores relacionados ao tubo de impedância realizados por discentes da UFG, sendo eles Nunes (2017), Rios (2017), Rocha (2018), Barbosa (2023) e Yumi (2023). Na segunda etapa foi construída uma tabela comparativa entre as especificações sugeridas pela norma para medições das propriedades dos materiais utilizando o tubo e os métodos utilizados pelos estudos anteriores. Em uma terceira

fase iniciou-se atualizações no tubo de impedância para que ele correspondesse a normativa e foram realizadas apurações não feitas em trabalhos anteriores, dentre essas determinações estão:

Tabela 1. Modificações para adequação segundo a norma ASTM E 2611-09

Itens	Determinações
1	Novos apoios para substituir os que estavam frouxos
2	Definição da frequência de trabalho, por meio do cálculo das frequências superior e inferior
3	Calibração dos microfones
4	Mínimo de 3 amostras testes sob mesmas condições
5	A fonte sonora deve gerar sinal que seja pelo menos 10 dB maior que o ruído de fundo
6	A distância entre o microfone e o espécime deve ser analisada conforme a superfície do material estudado
7	Determinação da frequência máxima de 5600 Hz de acordo com a recomendação da norma para o modelo de microfone com diâmetro do diafragma de 12,20 mm e diâmetro nominal de 1/2
8	Dimensão transversal de ponta a ponta (resolvido por meio da troca dos apoios)
9	Análise de ondas planas, essas devem ser completamente desenvolvidas antes de chegarem ao microfone, diferentes frequências podem necessitar de espaçamentos entre os microfones de formas diferentes
10	Terminação fracamente anecoica
11	Estudo da pressão interna, não sendo necessário no presente tubo uma saída para alívio de pressão
12	Cálculo dos espaçamentos entre os microfones
13	Testes no tubo sem amostra

A Tabela 1 exibe alguns dos tópicos estudados e ajustados no trabalho de iniciação científica, que são recomendados pela norma a fim de obter melhoria nos resultados e aplicar alguma metodologia.

Todavia, é fundamental discorrer sobre as condições experimentais para realização das medições. As variáveis controladas são a temperatura do laboratório que influencia diretamente no valor da velocidade do som, vibrações na bancada e ruído de fundo para não ocorrer interferência nas aplicações.

A Figura 1 exemplifica um tubo de impedância com os elementos formadores em evidência, como a fonte sonora, amplificador, os microfones, o espécime estudado, e no final a terminação anecóica, também apresenta a localização de algumas das variáveis calculadas pelos modelos matemáticos abaixo. As equações da norma ASTM E 2611-09 utilizadas e incrementadas

no código do MATLAB foram, para cálculo da frequência de trabalho, em Hz, sendo f_l a frequência inferior, em Hz,

$$f_l < f < f_u \quad (1)$$

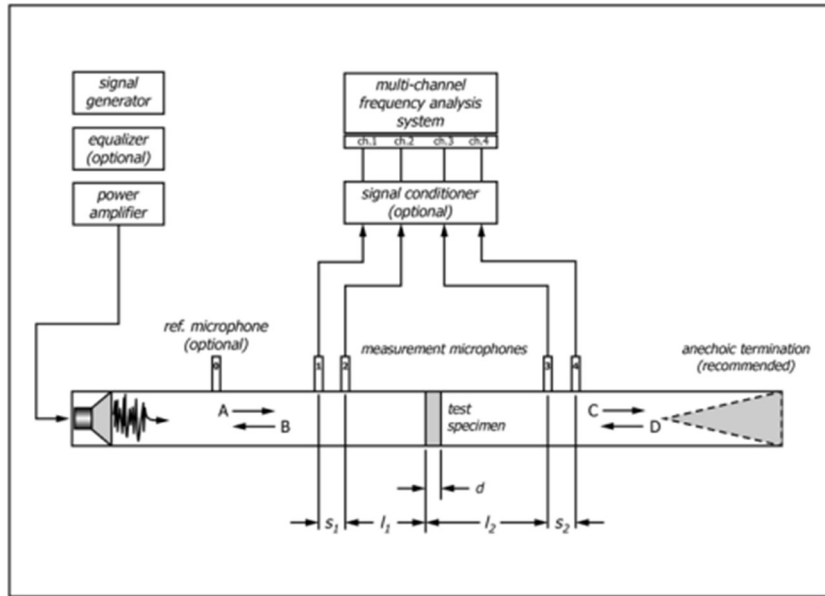


Figura 1. Modelo de montagem do tubo de impedância segundo a norma ASTM E 2611-09 (Autor, 2025).

Para calcular a frequência superior f_u , em Hz, ou o diâmetro d , em metros, sendo a velocidade do som no tubo “c”, em m/s, e a constante “k” igual a 0,586, temos,

$$f_u < \frac{k \times c}{d} \quad (2)$$

A fórmula para o cálculo do espaçamento entre os microfones “s”, em metros, é

$$s \ll \frac{c}{2 \times f_u} \quad (3)$$

sendo que o espaçamento máximo é de 80% de $c/2f_u$.

Para calcular “c” a velocidade do som no tubo, é utilizada a temperatura da sala “T”, em graus Celsius, por esse motivo a sala do laboratório LabMEC/UFG tem a temperatura controlada para evitar variações durante as medições e testes,

$$c = 20,047 \sqrt{273,15 + T} \quad (4)$$

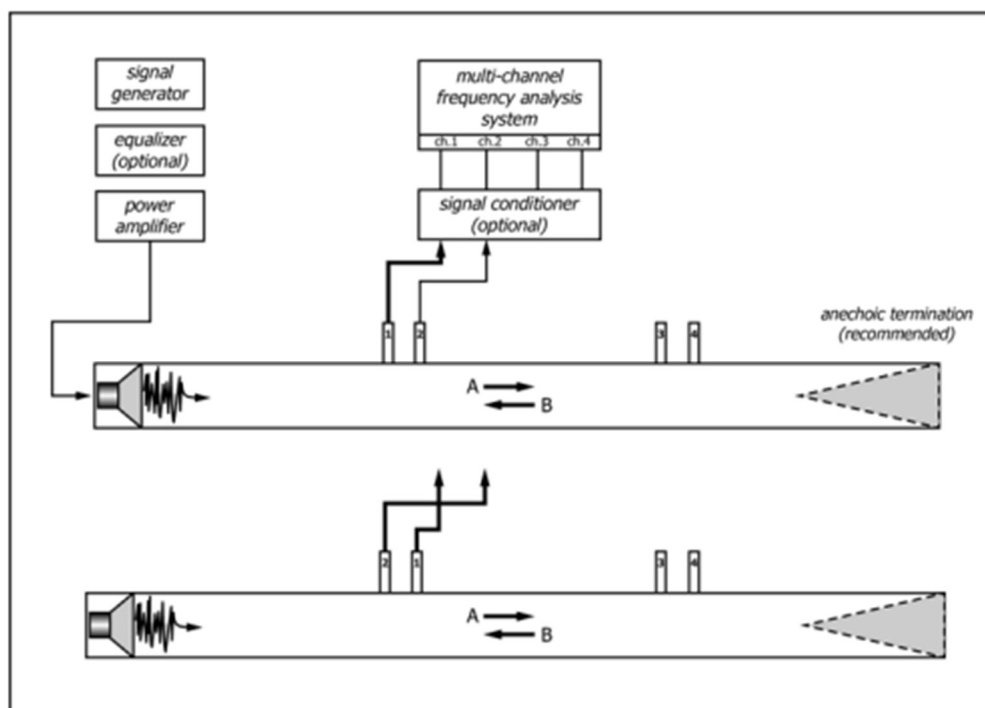


Figura 2. Configuração dos microfones (Autor, 2025).

A calibração dos microfones é obtida a partir das funções de transferência, representada com a letra H , de acordo com as configurações apresentadas pela norma ASTM E 2611-09. A Figura 2 ilustra a disposição dos microfones no caso do tubo de impedância do LABMEC/UFG e com setas exibi a troca de posição dos microfones e a permanência desses nos mesmos canais de origem para o cálculo de calibração a partir do sinal gerado pela fonte sonora e uso da seguinte equação,

$$H_{n,ref}^c = (H^I \times H^{II})^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

No início do trabalho em janeiro de 2025, dentro dos 32 itens listados sobre características físicas e propriedades do tubo de impedância, e da metodologia sugeridas pela norma ASTM E 2611-09 na planilha comparativa com trabalhos anteriores, o tubo de impedância cumpria com cinco itens, ou 15,16%, faltando 84,84% da listagem a ser regularizada, como mostra a Figura 3. Esse resultado, mostra a grande divergência dos estudos com a norma que impossibilitam a comparação com outros trabalhos e invalida cientificamente os dados. Ao final do período dedicado à iniciação científica, todos os itens listados tornaram-se efetivos.

Os itens efetivados foram marcados com a cor verde tanto na Figura 3 quanto na Figura 4. As colunas apresentam em ordem da esquerda para a direita, o item, o que a norma indica, se trabalhos anteriores abordaram, o que havia de errado e o que poderia ser feito para solucionar a questão descrita.

A	B	C	D	E
Item	Tr norma	foi feito no trabalho	o que há de errado	o que deve ser feito
tubo1	tubo deve ter seção transve	sim		
tubo1.1	dimensão transversal de pon	pode melhorar	apoios frouxos	novos apoios
tubo1.2	tubo reto e superfície interna	conferir	conferir	
tubo1.3	pés e suportes compatíveis	não	apoios frouxos	novos apoios
faixa de frequência2.1	o espaçamento dos microfor	não		
faixa de frequência2.2	frequência superior igual a 5i	não	limite de frequência superior e	utilizar f dentro do limite calc
faixa frequência 2.3	medições teste para os limitx	não	não foi feito nos trabalhos an	definir limites de frequência e
comprimento tubo3	mínimo de 3 diâmetros de tu	sim		
comprimento tubo3.1	as ondas planas devem ser c	conferir	conferir se as f estudadas se	teste
terminação 4.1	fracamente anecóica	não		produção e teste
terminação 4.2	instalar uma cunha ou seccã	não	terminação circular	produzir uma nova terminaçõ
terminação 4.3	a terminação deve ser remov			
ventilação do tubo 5.1	incluir uma abertura de alivio	não	não foi estudado a pressão li	conferir a pressão interna do
suporte do tubo 6.1 (destacá	pode ser integrado ao tubo c		não foi utilizado selantes	
suporte do tubo 6.2 (circular)	amostra visível tanto pela fre	sim	suportes frouxos	arrumar
fonte sonora 7.1	deve ter potência uniforme n	sim		
fonte sonora7.2	a fonte sonora e a transição i	sim		
terminação 8.1	conferir se a impedância me	não	não foi realizado	caso seja alta, é recomendad
microfones 9.1	microfone 1/2", diâmetro do	não	a frequência máxima utilizad	determinar limites de frequet
microfones 9.2	é recomendado que o diâmet		não foi checado	
microfones 9.3	caso no microfone haja uma		não foi checado	
microfones 9.4(espaçament	o espaçamento entre os micr			
microfones9.5(espaçamento	o espaçamento máximo entr		distâncias superiores as rec	
microfones 9.6 (superfície a	a distância entre o microfon	não		11, tipo de superfície : lisa(me
microfones 9.7	devem estar nivelados com z	sim		
amostra	mínimo de 3 amostras testac			
procedimento	para obter a matriz de transfi	não		medição

Figura 3. Tabela comparativa antes dos ajustes (Autor, 2025).

Item	Tr	norma	foi feito no trabalho	o que há de errado	o que deve ser feito
tubo1		tubo deve ter seção transve	sim		
tubo1.1		dimensão transversal de pon	pode melhorar	apoios frouxos	novos apoios
tubo1.2		tubo reto e superfície interna	conferir	conferir	
tubo1.3		pés e suportes compatíveis	não	apoios frouxos	novos apoios
faixa de frequência2.1		o espaçamento dos microf	não		
faixa de frequência2.2		frequência superior igual a 5i	não	limite de frequência superior e	utilizar f dentro do limite calc
faixa frequência 2.3		medições teste para os limit	não	não foi feito nos trabalhos an	definir limites de frequência
comprimento tubo3		mínimo de 3 diâmetros de tu	sim		
comprimento tubo3.1		as ondas planas devem ser c	conferir	conferir se as f estudadas se	teste
terminação 4.1		fracamente anecóica	não		produção e teste
terminação 4.2		instalar uma cunha ou seccõ	não	terminação circular	produzir uma nova terminaç
terminação 4.3		a terminação deve ser remov			
ventilação do tubo 5.1		incluir uma abertura de alivio	não	não foi estudado a pressão li	conferir a pressão interna do
suporte do tubo 6.1 (destac		pode ser integrado ao tubo o		não foi utilizado selantes	
suporte do tubo 6.2 (circular)		amostra visível tanto pela fre	sim	suportes frouxos	arrumar
fonte sonora 7.1		deve ter potência uniforme n	sim		
fonte sonora7.2		a fonte sonora e a transição i	sim		
terminação 8.1		conferir se a impedância me	não	não foi realizado	caso seja alta, é recomendar
microfones 9.1		microfone 1/2", diâmetro do	não	a frequência máxima utilizad	determinar limites de frequ
microfones 9.2		é recomendado que o diâmet		não foi checado	
microfones 9.3		caso no microfone haja uma		não foi checado	
microfones 9.4(espaçament		o espaçamento entre os micr			
microfones9.5(espaçamento		o espaçamento máximo entr		distâncias superiores as rec	
microfones 9.6 (superfície a		a distância entre o microfon	não		11, tipo de superfície : lisa(ma
microfones 9.7		devem estar nivelados com c	sim		
amostra		mínimo de 3 amostras testac			
procedimento		para obter a matriz de transfe	não		medir

Figura 4. Tabela comparativa depois dos ajustes (Autor, 2025).

Cabe-se salientar os resultados obtidos pelas melhorias e verificações aplicadas no tubo e nas medições. A Figura 5 e a Figura 6 exibem os apoios novos, esses garantem melhor manuseio, alinhamento e estabilidade do tubo. A correção dos microfones não foi realizada em mensurações passadas, e após adicionar esse fator nos cálculos das propriedades acústicas, é possível obter precisão nas medidas, qualidade do sinal e interpretação correta dos dados.

O espaçamento máximo entre os microfones, a partir do cálculo, é de 20,5 mm, entretanto, em trabalhos anteriores que também abordaram a perda de transmissão sonora em silenciadores acústicos como de Yumi (2023) foram utilizados espaçamentos de 30 mm e 50 mm entre os microfones, estando fora da recomendação da norma para esse tipo de medição. Além disso,

também há disparidade nos valores de frequência superior entre os trabalhos antecedentes e norma, sendo esses respectivamente, 6860 Hz para o espaçamento de 20 mm e a calculada de aproximadamente 6716 Hz, porém, a frequência máxima para o modelo de microfone 1/2 é de 5600 Hz, segundo sugestão da ASTM E 2611-09, sendo essa a frequência de corte, quando o microfone perde a precisão das medidas.



Figura 5. Apoios novos do tubo de impedância (Autor, 2025).



Figura 6. Tubo de impedância do LabMEC/UFG com apoios novos (Autor, 2025).

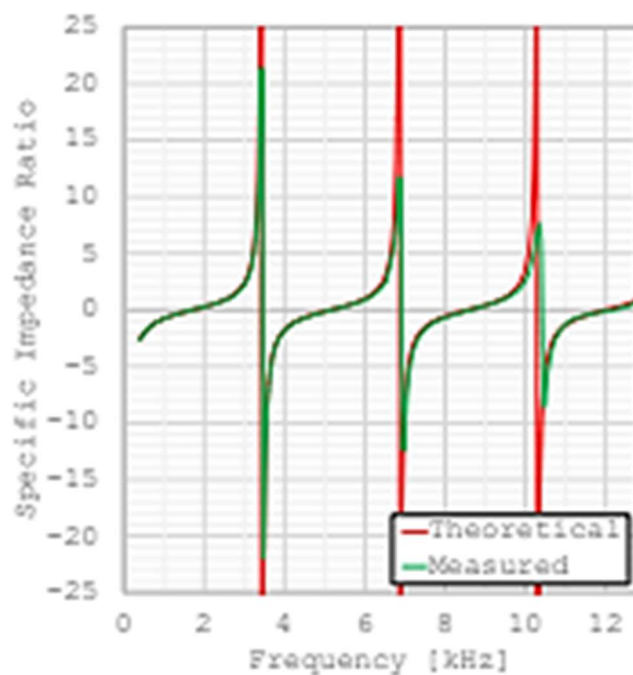


Figura 7. Medição de relações de impedância específica de cavidades de ar de 50mm (KIMURA et al., 2014).

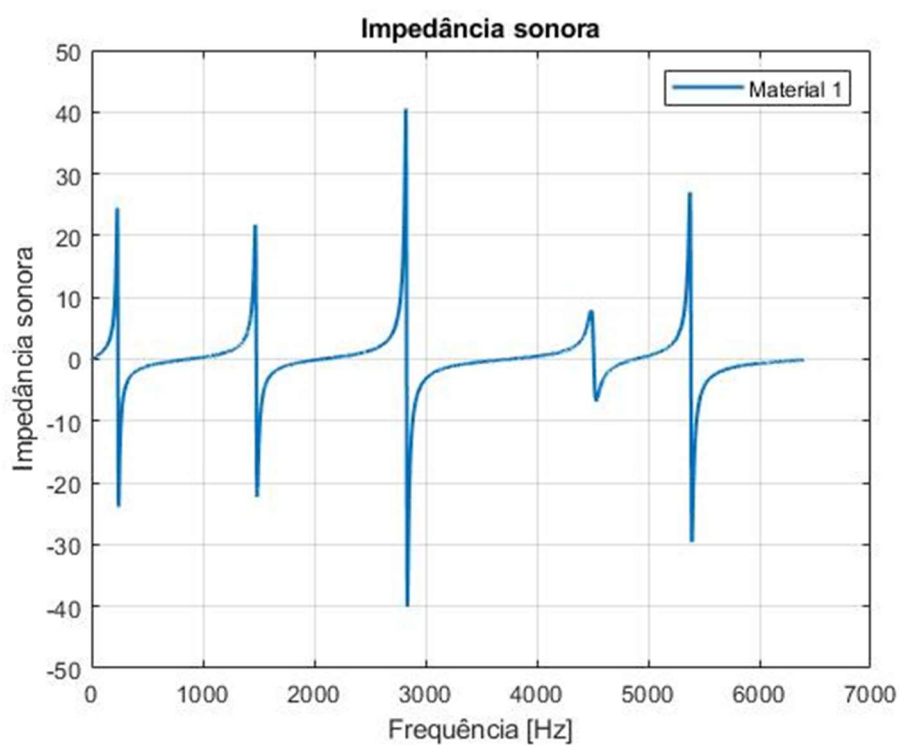


Figura 8. Medição da impedância específicas de cavidades de ar em 50 mm, no tubo LABMEC/UFG (Autor, 2025).

Nas Figuras 7 e 8 são apresentados gráficos de impedância sonora, nestes foram consideradas amostras de ar com 50 mm de comprimento. Pode-se notar que as medidas realizadas na mesma configuração no tubo do presente estudo se assemelham aos padrões das curvas de impedância obtidas no experimento de KIMURA et al., 2014, que apresentou boas concordâncias nos dados em seu trabalho. Esse fato, evidencia os avanços na adequação do tubo, pois o estudo de Kimura também segue uma metodologia normativa possibilitando tal comparação.

4 CONCLUSÕES

Com os itens averiguados na planilha comparativa sendo totalmente correspondidos, conseguiu-se cumprir com o plano de trabalho e atender às necessidades da existência de um equipamento que atenda às especificações da ASTM E 2611-09, tratando-se de medições da perda de transmissão sonora em silenciadores acústicos. Além disso, houve o aprendizado em terminologias técnicas, conceitos de acústica, metodologia científica, escritas acadêmicas, interpretação de resultados e uso do Matlab. Portanto, o trabalho em questão acatou os objetivos propostos, capacitando o aparato para medições válidas e de boa qualidade. Por fim, sendo um recurso a ser incrementado no laboratório de acústica LabMEC/UFG placas com instruções e recomendações de uso, para que outros estudantes possam futuramente dar continuidade a pesquisas em engenharia acústicas e testes com materiais que além de terem a capacidade de amenizar a poluição sonora sejam por exemplo sustentáveis.

Agradecimentos. Os autores agradecem à EMC (Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação) da Universidade Federal de Goiás, pelo suporte na disponibilização de espaços destinados a pesquisa.

REFERÊNCIAS

- KIMURA, Masateru; INCE, Jason Kunio; SCHUHMACHER, Andreas; RYU, Yunseon. A new high-frequency impedance tube for measuring sound absorption coefficient and sound transmission loss. Conference Paper, nov. 2014.
- ROSSING, Thomas D. The Science of Sound. 3. ed. San Francisco: Addison-Wesley, 2007.
- OMS – ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. Environmental Noise guidelines for the European Region. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe, 2018. Disponível em: <https://www.who.int/publications/i/item/9789289053563>. Acesso em: 29 ago. 2025.
- NUNES, Luan P. P. Projeto de aparato experimental para análise de perda de transmissão sonora. Goiânia, Brasil, 2017.
- YUMI, Gabriela. Adequação do tubo de impedância do Laboratório de Mecânica Aplicada da Universidade Federal de Goiás para medição de perda de transmissão sonora pelo método das duas cargas. Goiânia, Brasil, 2023.



V CONGRESSO 20
PPGMEC 25

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA DA MANUTENÇÃO CENTRADA NA CONFIABILIDADE

¹ Felipe C. Melo, ² Pedro Henrique de C. Teotonio, ¹ Fernanda C. T. D Troysi

¹ Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Goiás, Estrada Municipal, Quadra e Área Lote 04 - Bairro Fazenda Santo Antônio, Aparecida de Goiânia, Goiás, Brasil

² Embraer, 1205 General Aviation Dr, Melbourne, FL 32935 - EUA

fmfelipecmelo@gmail.com, fernandatroyysi@ufg.br, pedro.teotonio877@gmail.com

DOI: 10.5281/zenodo.19041083

Resumo. A manutenção aplicada às operações produtivas baseou-se em conceitos diversos ao longo do tempo, seja elas manutenções corretivas, preventivas ou preditivas. A confiabilidade teve início e desenvolvimento a partir da Segunda Guerra Mundial e, após décadas de estudo e desenvolvimento, é atualmente um tema presente na melhoria e otimização dos processos de manutenção. A capacidade de gerir, tratar e coletar dados, com monitoramento e registros avançados dos processos de manutenção, favoreceu o estudo crescente em confiabilidade. O crescimento dos estudos relacionados a indústria 5.0, a predominância das publicações nos países das maiores economias e pesquisadores com publicações contínuas nos temas de manutenção e confiabilidade são apresentados ao longo desse estudo. A discussão em torno da análise bibliométrica, por meio de buscas nas bases Scopus e Web of Science, evidencia os avanços e a pertinência do tema da confiabilidade e manutenção centradas na confiabilidade ao longo do mundo nos últimos 5 anos.

Palavras-chave: Manutenção; Confiabilidade; Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC); Análise de Confiabilidade.

1 INTRODUÇÃO

A confiabilidade não era rigorosamente definida até meados da Segunda Guerra Mundial, próximo ao ano de 1940, e foi primeiramente abordada nos EUA. Naquele período, por meio do desenvolvimento de máquinas e produtos de guerra, como interruptores eletrônicos, radares e válvulas pneumáticas, a confiabilidade limitava-se a estudar novos materiais e a avaliar a fadiga dos componentes e dos sistemas. A partir de então, nos anos de 1950, a confiabilidade despertava interesse maior, e, em 1951, Wallodi Weibull divulga a distribuição Weibull, atualmente amplamente utilizada para estudos e desenvolvimento de engenharia centrado na confiabilidade. A engenharia dos motores Pratt & Whitney J58, por Abernethy, utilizou sistematicamente a análise de confiabilidade por meio de distribuições e teorias de Weibull até 2021, quando Abernethy faleceu aos 91 anos. Entre tantos trabalhos de pesquisa e engenharia em confiabilidade clássica, como análise de modos e efeitos de falha, burn-in, crescimento de confiabilidade e confiabilidade do sistema, este artigo escolhe discutir diversas metodologias, preocupações e novos desenvolvimentos importantes em testes acelerados (TA) e manutenção. (LIAO, 2024)

Os custos têm grande influência nas operações de manutenção, representando diretamente o sucesso ou o insucesso da companhia. Nas indústrias marítimas, representam entre 20% e 40% do custo operacional. Dessa forma, controlar os procedimentos e a efetividade da manutenção gerará um impacto financeiro positivo ao longo da cadeia produtiva, ainda que, historicamente, a manutenção seja vista como um custo inerente e não como uma ferramenta de ganho de produção. (MUNTAZIR, 2020) (SILVA, 2024)

A manutenção se mantém como tema desafiador, representando diretamente relação com os custos operacionais de empresas e afetando as tomadas de decisão operacionais, gerando necessidades de estudos aprofundados para maior desempenho dos departamentos de manutenção, frente aos conceitos tradicionais já amplamente utilizados nas rotinas de indústrias de manufatura e serviços. Gerar entendimento entre gestão, tomada de decisão digital baseada em dados e condições, atuação técnica e operação está entre os desafios. (ENDRENYI J, 2001) (SILVA, 2024)

Modelos matemáticos têm sido amplamente estudados e desenvolvidos para sistemas complexos de avaliação de confiabilidade, estabelecendo relação direta com os tópicos da indústria 4.0 e da indústria 5.0, inseridos nos departamentos de manutenção. A busca por alternativas estatísticas vem de encontro aos crescentes estudos sobre confiabilidade e manutenção centrada na confiabilidade. (PSAROMMATIS, 2023)

2 DESENVOLVIMENTO

Tratando dos conceitos relacionados no artigo de 1957, o *Advisory Group on Reliability of Electronic Equipment* forneceu a definição clássica de confiabilidade: “a probabilidade de um produto executar, sem falhas, uma função especificada sob condições dadas, por um período de tempo especificado”. Tal definição possui a mesma explicação quando avaliamos diante da norma NBR 5462, que é expressa como “Capacidade de um item desempenhar uma função requerida sob condições especificadas, durante um dado intervalo de tempo”.

As tomadas de decisões para a eficiência da manutenção estão frequentemente relacionadas à necessidade de melhorar as ações inadequadas de manutenção, conforme mencionado por ZHILIANG (2020). Dessa forma, ferramentas e critérios, como custo, risco, Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC), modelagem da informação e processos analíticos, são frequentemente utilizados estrategicamente.

Desse modo, entendendo a importância da MCC como pilar nas tomadas de decisão e ganhos para os departamentos de manutenção, a análise bibliométrica propõe estudo atualizado da literatura, publicações e citações ao longo do mundo. (DOOYOUNG, 2019) (GUO, 2020)

Conceitos relacionados a MCC constam dos estudos identificados para a análise bibliométrica desse trabalho. As tradicionais menções à manutenção preventiva e à manutenção corretiva encontram nomenclaturas como manutenção baseada na condição e monitoramento de condição, também chamados de manutenção preditiva. Segundo CATELANI (2020), uma análise contínua dos parâmetros de um item ou de um sistema em operação, para monitorar desgaste e deterioração.

O estudo se desenvolve com base na definição de análise bibliométrica, que visa ao estudo do progresso científico, avaliando qualitativamente citações, número de publicações, temas prioritariamente abordados e estudados, rede de conhecimento, principais pesquisadores e técnicas utilizadas, além dos principais focos de estudo. Dessa forma, é possível reconhecer autores, pesquisadores do cenário nacional e internacional, bem como o direcionamento do progresso científico no tema estudado ao longo de um período pré-definido na análise bibliométrica. (LIMA, 2020)

3 METODOLOGIA

A metodologia adotada neste estudo compreendeu as seguintes etapas:

- A busca bibliográfica foi realizada recuperando *títulos, resumos e palavras-chave*.

- As palavras-chave definidas foram: “reliability” e “reliability centered maintenance”.
- Foram utilizadas exclusivamente as bases Web of Science e Scopus, em razão de sua alta representatividade científica e ampla cobertura de publicações de qualidade.
- Foram incluídos artigos, conference papers e artigos de revisão, publicados em língua inglesa, sem restrição geográfica.
- Apenas documentos publicados entre 2021 e 2025 foram considerados.
- Livros e capítulos de livro foram excluídos da busca.
- Os registros obtidos foram importados para o software RStudio para tratamento bibliométrico.
- Documentos duplicados foram identificados e removidos.
- Após a filtragem, permaneceram 278 documentos da Scopus e 134 da Web of Science, e, na sequência, foi realizada a exclusão das duplicatas, assim, compuseram o banco de dados final para análise.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise bibliométrica realizada permitiu avaliar publicações, citações, produtividade de autores, redes de colaboração e tendências temáticas da manutenção centrada na confiabilidade (MCC) no período de 2021 a 2025.

A Figura 1 mostra que o volume anual de publicações cresceu expressivamente entre 2021 e 2022, mantendo-se relativamente estável entre 2022 e 2024. Observa-se apenas uma leve redução em 2024 (aproximadamente 5% em relação a 2023). Contudo, há uma queda mais acentuada em 2025, com uma redução aproximada de 26% no número de artigos em comparação com o ano anterior. Essa diminuição pode estar associada ao aprofundamento dos estudos voltados à Indústria 5.0, que têm direcionado o foco para temas emergentes, como monitoramento em tempo real, digitalização e integração ciberfísica, reduzindo, proporcionalmente, a produção em abordagens tradicionais da MCC.

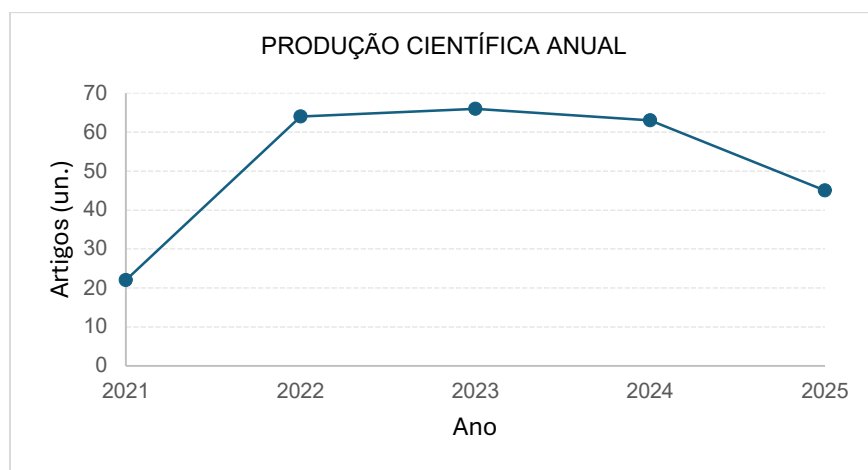


Figura 1 – Evolução anual do número de publicações sobre MCC (2021–2025).

Termos como modo de falha, manutenção preditiva, manutenção baseada na condição e gestão de risco ganharam destaque, evidenciando um foco crescente em estratégias para prever, mitigar e gerenciar falhas, o que aumenta a eficácia dos planos de manutenção. A presença de termos como políticas e regras também evidencia a relevância das normas e diretrizes regulatórias na área.

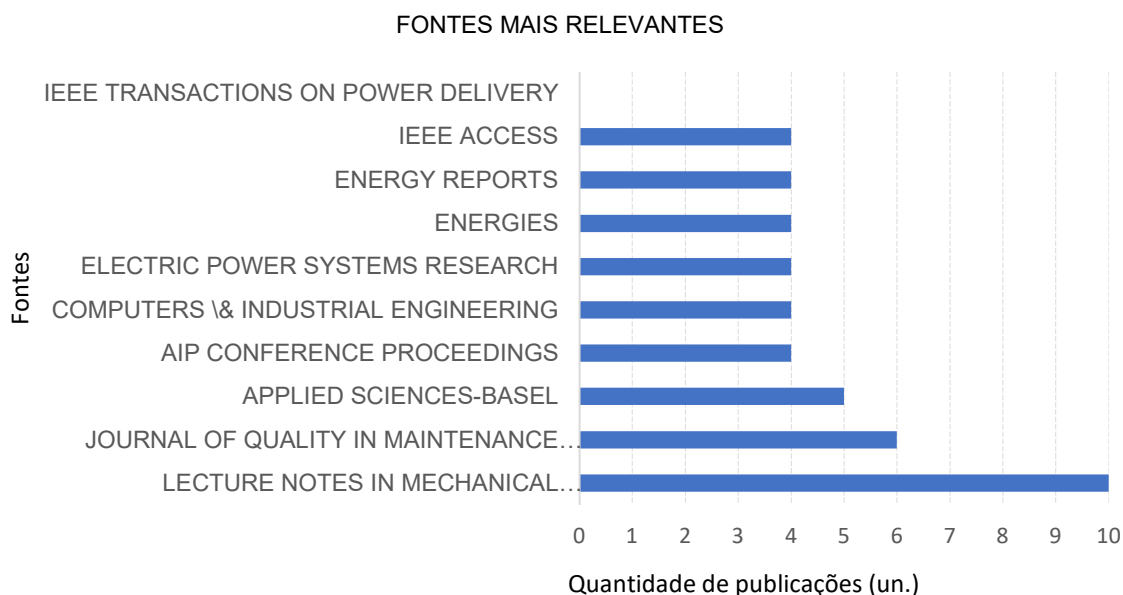


Figura 2 – Representação do número de publicações em periódicos.

A Figura 2 apresenta os periódicos com maior número de publicações, evidenciando a difusão do tema em veículos especializados e multidisciplinares. Em relação aos autores (Figura

3), cerca de 50% mantiveram produção contínua ao longo do período, demonstrando engajamento e contribuição consistentes para o avanço científico na área.

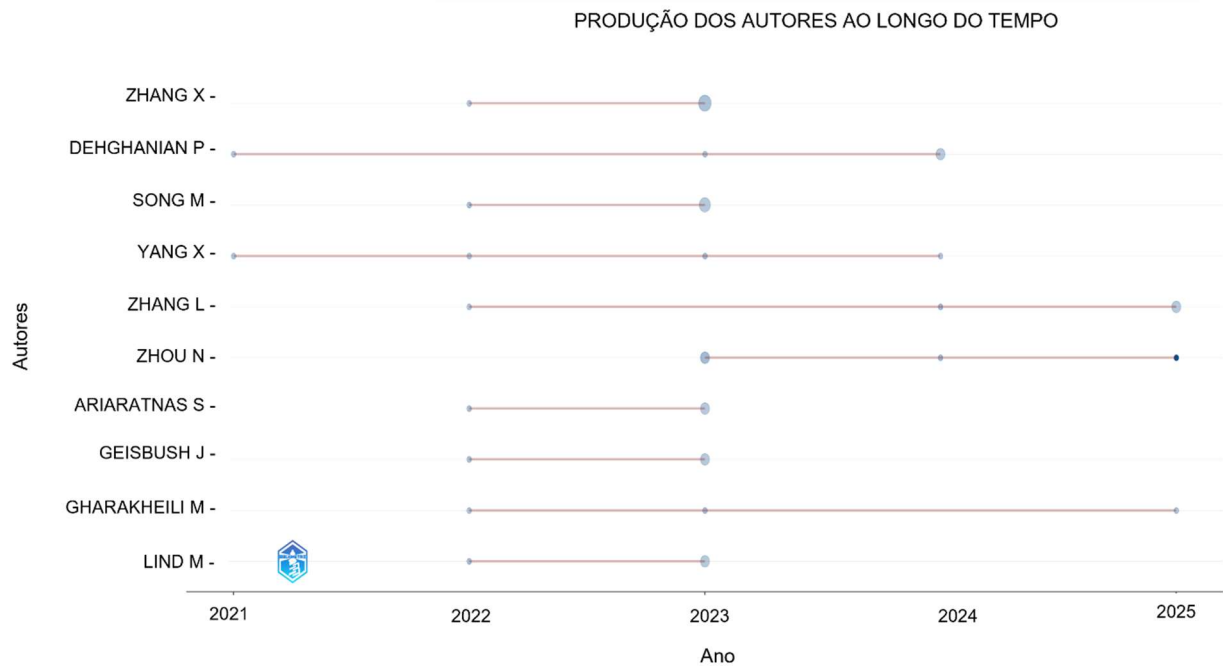


Figura 3 – Ano de realização das publicações dos autores relacionados ao estudo bibliométrico

A análise institucional evidencia a forte presença de universidades localizadas em países de relevância econômica global, com destaque para a China, os Estados Unidos e o Irã, este último, representado por três instituições entre as mais produtivas. A Universidade de São Paulo figura entre as principais da América Latina. Todas as instituições analisadas apresentaram crescimento na produção científica, evidenciando o interesse crescente pelo tema.

Observa-se, na Figura 4, que trabalhos como o de Polenghi (2022) destacam-se, ultrapassando 20 citações e evidenciando forte influência na área, especialmente em temas relacionados à integração da manutenção com sistemas inteligentes. Outros autores relevantes, como Shannon (2023) e Mubarak (2022), também contribuem de maneira significativa, reforçando tendências emergentes relacionadas à confiabilidade aplicada a sistemas complexos, à energia nuclear e à engenharia computacional.

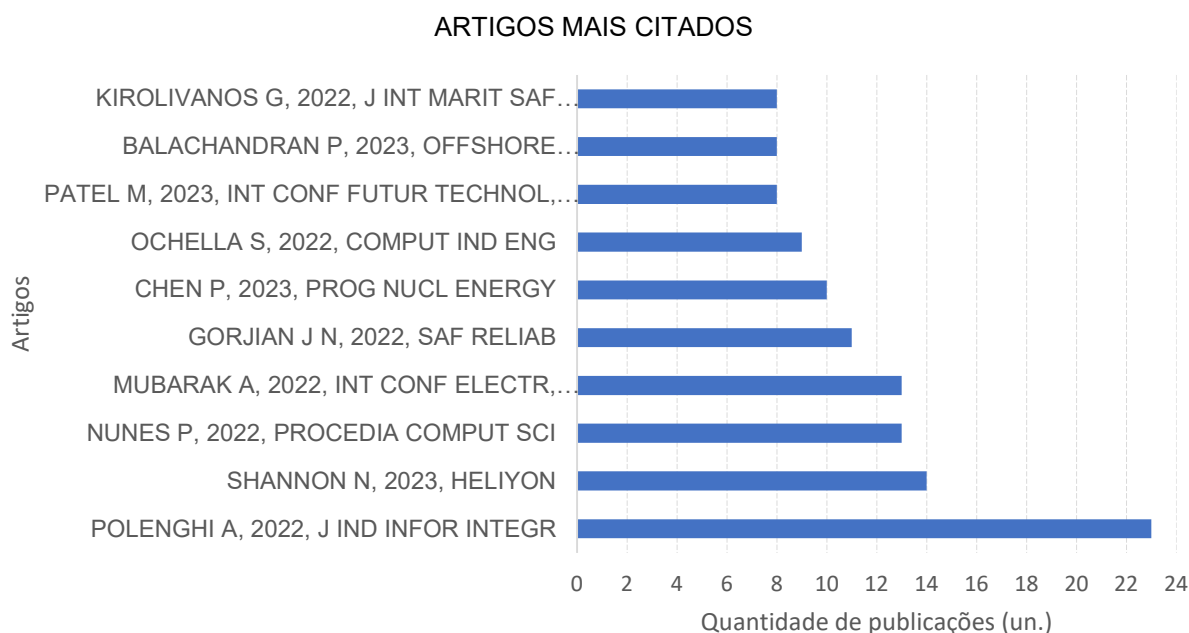


Figura 4 – Artigos mais citados.

No panorama geopolítico (Figura 5), os dados indicam correlação entre o desenvolvimento econômico, o investimento em pesquisa e o volume de publicações. A China lidera com um aumento expressivo na produção científica, seguida pelo Irã. Países como o Reino Unido e o Brasil apresentam crescimento mais moderado, embora ainda significativo.

A análise da rede de coocorrência (Figura 6) revela a interação entre conceitos tradicionais de MCC, como estrutura, implementação, priorização e tomada de decisão, e tópicos emergentes relacionados à digitalização e à predição. Essa interconexão demonstra a evolução do campo rumo a abordagens integradas e orientadas por dados.

O mapa temático (Figura 7) complementa essa análise ao mostrar a diversidade de áreas associadas à MCC e ao sugerir caminhos promissores para novas investigações.

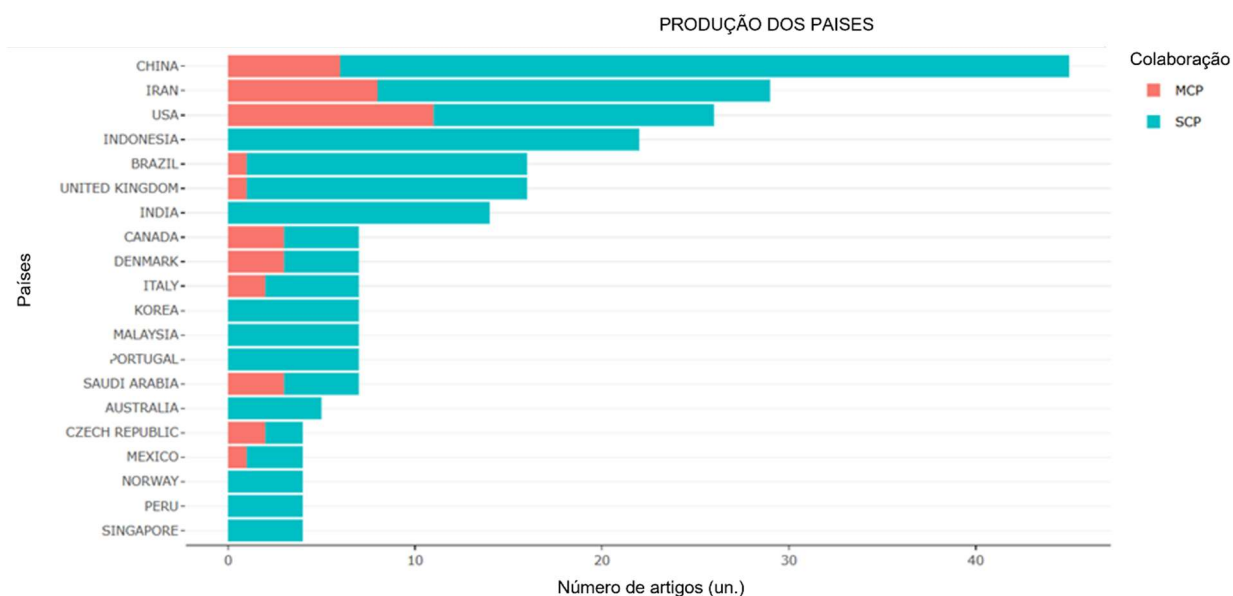


Figura 5 – Quantidade de artigos publicados ao longo dos anos em cada país

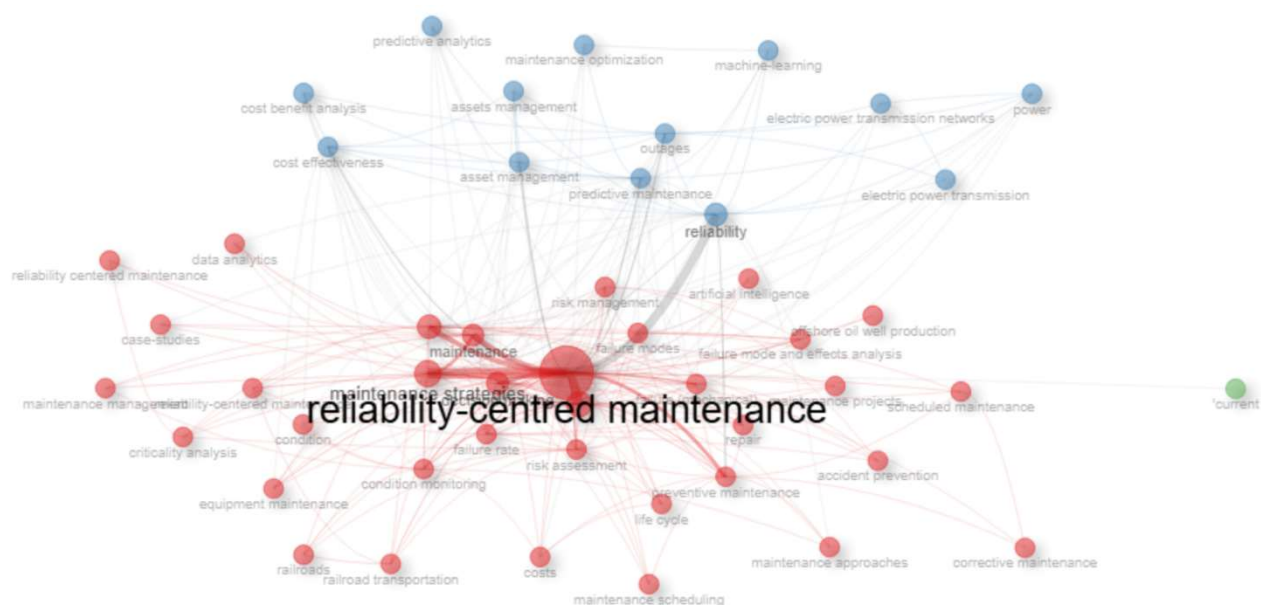


Figura 3 – Rede de coocorrência

Após a apresentação e discussão de todos os resultados, a manutenção e a confiabilidade

Países emergentes, com frente de crescimento econômico e necessidades de avanço na

Também fica clara a oportunidade de melhoria na relação entre pesquisadores e autores de

As discussões de manutenção avançam em paralelo às tecnologias e à digitalização das

PPGMEC-2025

Revistas e periódicos de diferentes áreas recebem publicações expressivas sobre o setor, de maneira difundida, o que permite concluir a pluralidade do campo abordado no artigo.

REFERÊNCIAS

- CATELANI, M., L. CIANI, D. G. and PATRIZZI, G., Optimizing Maintenance Policies for a Yaw System Using Reliability-Centered Maintenance and Data-Driven Condition Monitoring, in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 69, no. 9, pp. 6241-6249, Sept. 2020.
- DOOYLOU L.; DONGSU C. Analysis of the Reliability of a Starter Generator Using a Dynamic Bayesian Network, *Reliability Engineering and System Safety*, Daegu, 2019.
- ENDRENYI J. et al., The present status of maintenance strategies and the impact of maintenance on reliability in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 16, no. 4, pp. 638-646, Nov. 2001.
- GUO, J.; Z. Li and M. Li, A Review on Prognostics Methods for Engineering Systems in *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 69, no. 3, pp. 1110-1129, Sept. 2020.
- LIAO, H. Accelerated Testing and Smart Maintenance: History and Future in *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 73, no. 1, pp. 33-37, March 2024.
- LIMA, F. R.; GOMES, R.; Conceitos e tecnologias da Indústria 4.0: uma análise bibliométrica, *Revista Brasileira de Inovação*, São Paulo, 2020.
- MUNTAZIR A., MAHMOOD S., An overview of maintenance management strategies for corroded steel structures in extreme marine environments, *Marine Structures*, Volume 71, 2020.
- PSAROMMATIS, F., MAY, G., AZAMFIREI, V., Envisioning maintenance 5.0: Insights from a systematic literature review of Industry 4.0 and a proposed framework, *Journal of Manufacturing Systems*, Volume 68, 2023.
- SILVA, J. R. dos S.; CAMPOS, M. S. et OLIVEIRA, F. L. P. Engenharia da Confiabilidade: Uma Discussão Sobre Medidas de Importância de Componentes para a Manutenção no Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Rio Grande do Sul, 2024.
- ZHILIANG M., REN Y., XIANG R. X., TURK Z., Data-driven decision-making for equipment maintenance, Volume 112, 2020.



ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS OBTIDAS A PARTIR DO ENSAIO DE TRAÇÃO EM UM TUBO FABRICADO PELO PROCESSO COLD METAL TRANSFER

¹ João Gabriel N. Rodrigues, ¹ Maria Helena R. Moreno, ¹ Demostenes Ferreira Filho, ¹ Lucas L. da Silva

¹ Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Goiás
Avenida Ingá, Prédio B5, Campus Samambaia, 74.690-900, Goiânia/Goiás, Brasil
gabriel.joao@discente.ufg.br, moreno2@discente.ufg.br, demostenesferreira@ufg.br,
lucaslauriano@discente.ufg.br

DOI: 10.5281/zenodo.19041111

Resumo. A Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (Wire Arc Additive Manufacturing – WAAM) tem se destacado como uma alternativa promissora para a fabricação de componentes metálicos de grande porte, devido à sua elevada taxa de deposição e eficiência energética. Dentre suas variantes, o processo *Cold Metal Transfer* (CMT) apresenta vantagens como baixo aporte térmico, alta estabilidade do arco e menor geração de respingos, favorecendo a obtenção de peças com menor distorção e melhor acabamento superficial. Este trabalho tem como objetivo comparar as propriedades mecânicas de um tubo fabricado pelo processo CMT com aquelas reportadas na literatura para o processo GMAW convencional. Para isso, foram realizados ensaios de tração segundo a norma ASTM A370, com posterior comparação aos limites mínimos estabelecidos pela ABNT NBR 5590. O tubo, confeccionado em aço ER70S-6 sob vazão de gás de proteção de 20 L/min (Ar 85% + CO₂ 15%), apresentou valores de limite de escoamento e resistência à tração de 385,69 MPa e 426,15 MPa, respectivamente, sendo esses valores acima dos reportados na literatura para o GMAW. Ademais, as análises por tomografia indicaram ausência de defeitos internos, confirmando a eficiência dos parâmetros empregados. Os resultados demonstram que o processo CMT é tecnicamente viável para a fabricação de componentes metálicos com propriedades mecânicas superiores às obtidas pelo GMAW, consolidando-se como alternativa competitiva para aplicações estruturais e industriais.

Palavras-chave: CMT, GMAW, MADA, Ensaio de Tração.

1 INTRODUÇÃO

A Manufatura Aditiva constitui um conjunto de tecnologias que constroem peças camada a camada a partir de modelos digitais feitos por software CAD, oferecendo vantagens como redução do desperdício de material durante o processo de deposição, possibilidade de fabricar peças com geometria complexa e maior flexibilidade de produção frente a processos de fabricação convencionais. Entre as várias famílias de MA, os processos de deposição por arco elétrico com fio (Wire Arc Additive Manufacturing - WAAM) destacam-se por sua elevada taxa de deposição, eficiência energética e boa relação custo-benefício para componentes metálicos, surgindo assim como alternativa competitiva para a fabricação de peças estruturais, reparos e fabricação de protótipos industriais de grande escala [1].

No WAAM, a variabilidade do processo (fonte de calor, modo de transferência de metal, estratégias de deposição e parametrização) exerce forte influência sobre a microestrutura, defeitos (porosidade, falta de fusão) e, sobre as propriedades mecânicas finais. Trabalhos de revisão e estudos experimentais destacam ganhos expressivos em produtividade, porém, alertam para desafios persistentes, dentre eles, controle de tensões residuais, formação de microestruturas heterogêneas e necessidade de pós-processamento para chegar no acabamento desejado e garantir propriedades mecânicas uniformes. Esses fatores tornam essencial a seleção apropriada dos parâmetros de deposição [2].

O processo Cold Metal Transfer (CMT) é uma variante do Gas Metal Arc Welding (GMAW) caracterizada por uma estratégia cíclica de alimentação e retração do arame durante o curto-circuito resultando em um baixo aporte térmico, mínima formação de respingos e estabilidade do processo [3]. Na literatura, o CMT é descrito como adequado para WAAM quando se busca reduzir a distorção térmica dos componentes, e melhorar o acabamento superficial, favorecendo uma menor necessidade de pós-processamento comparado ao GMAW [4]. Mecanismos físicos do CMT e seu impacto são objeto de estudos experimentais e modelagens para fundamentar a escolha de parâmetros em aplicações industriais.

Comparações entre CMT e o GMAW convencional indicam diferenças relevantes em termos de aporte térmico, geometria de cordão e propriedades mecânicas. Estudos experimentais comparativos reportam que componentes depositados por CMT frequentemente exibem menor porosidade, menor dureza dependente de tratamento térmico e, em diversos casos, melhores propriedades de tenacidade e resistência à tração quando comparados a amostras obtidas por GMAW sob condições análogas, embora os resultados sejam sensíveis ao material, à estratégia de

deposição e ao pós-processamento [5]. Essa variação ressalta a necessidade de estudos dirigidos a geometrias específicas e a critérios de falha para estabelecer recomendações processuais robustas.

Do ponto de vista industrial, o uso de WAAM-CMT tem avançado em setores que demandam deposição metálica controlada, como a indústria aeronáutica, automotiva, marítima e ferramentaria, onde a combinação de baixa distorção, adequada integração com máquinas CNC e possibilidade de utilização de múltiplos materiais atrai interesse para peças funcionais e reparos de alto valor [6]. Não obstante, as revisões mais recentes destacam lacunas como falta de protocolos padronizados de caracterização mecânica para peças WAAM-CMT, escassez de estudos comparativos sistemáticos em peças submetidas a ensaios representativos de serviço e necessidade de avaliar a repetibilidade industrial dos resultados [7].

Diante disso, o objetivo deste trabalho é relatar um estudo comparativo entre as propriedades mecânicas obtidas a partir do ensaio de tração realizado em um tubo fabricado pelo processo CMT juntamente com os valores reportados na literatura para o processo GMAW convencional.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O processo CMT consolidou-se como uma técnica promissora, destacando-se pela redução do aporte térmico, mínima geração de respingos e elevado controle sobre o processo. Um dos elementos centrais é o sistema de alimentação de arame, que atua de forma sincronizada com o arco elétrico, permitindo a retração e o avanço do eletrodo de maneira precisa. Esse mecanismo, controlado digitalmente, garante a deposição consistente de material e contribui para a estabilidade do arco, favorecendo a qualidade do material depositado [8]. Diferente do processo por curto-circuito convencional, em que a transferência metálica é controlada apenas eletricamente, o CMT combina controle elétrico e mecânico. O arame é alimentado até a poça de fusão, estabelecendo o curto-circuito, e em seguida retraído após um tempo predefinido, interrompendo a corrente e diminuindo significativamente o calor transferido para a peça. Durante o ciclo, o movimento reciprocante do arame provoca a extinção e a resignação sucessiva do arco. Esse funcionamento assegura maior regularidade na transferência de gotas, menor diluição e menor extensão da zona termicamente afetada, resultando em menores distorções e tensões residuais [9].

A sincronização entre o movimento mecânico de avanço e retração do arame e o controle elétrico da corrente no CMT é favorecido através do modo sinérgico, que é um modo de operação pré-programado na fonte CMT pela fabricante FRONIUS [10] [11]. A operação em modo sinérgico constitui um dos diferenciais dos equipamentos modernos de soldagem por arco. Nesse regime, os

parâmetros de soldagem são ajustados de forma interdependente a partir de uma variável principal, por exemplo a velocidade de alimentação do arame. Assim, a fonte de energia define automaticamente a corrente e a tensão correspondentes, garantindo que o arco opere em condições estáveis e repetitivas, mesmo sob variações operacionais. Essa correlação pré-programada, é estabelecida a partir de tabelas ou algoritmos que vinculam os valores elétricos ao comportamento dinâmico do arame, permitindo reduzir oscilações do arco, respingos e instabilidades [11] [12].

Ensaio comparativos entre o CMT e o MIG convencional, realizados em ligas de alumínio, indicaram que, embora o CMT apresente menor rendimento de fusão e maior potência média de soldagem, sua principal vantagem é a estabilidade do arco e a capacidade de preenchimento de folgas. Essa estabilidade possibilita a formação de cordões com melhor acabamento e menor incidência de defeitos, sobretudo em soldagens de raiz. Assim, o CMT se destaca não apenas por ser um processo de menor aporte térmico, mas também pela eficiência no controle da transferência metálica e pela qualidade superior dos cordões produzidos [13].

3 METODOLOGIA

O procedimento experimental realizado foi dividido em duas etapas. Na primeira etapa, foi realizada a fabricação de espécimes cilíndrico variando a vazão do gás de proteção e a partir dos mesmos, foi feita uma análise da influência da vazão do gás de proteção em defeitos internos nos espécimes, selecionando a vazão que resultou na menor quantidade de defeitos internos para confeccionar um tubo. Já na segunda etapa, foram realizados os procedimentos referentes ao ensaio de tração no tubo fabricado pelo processo CMT.

3.1 Equipamentos e Parâmetros

Para a confecção dos espécimes e do tubo, foi utilizada uma fonte de soldagem Fronius CMT TPS 400i em conjunto com um robô industrial Yaskawa Motoman HP 20D para automatizar o processo de fabricação MADA.

Foi utilizado um arame solda ER70S-6 com 1,2 mm de espessura como metal base. O processo de deposição ocorreu em uma placa de Aço Carbono como substrato. O gás de proteção empregado foi uma mistura de Argônio (Ar) 85% e Dióxido de Carbono (CO₂) 15% com vazão de 20 L/min e tempo de pré gás de 1,2 s.

A fonte de soldagem CMT da Fronius funciona com base nas leis sinérgicas [14], sendo assim, é preciso selecionar o valor de apenas um parâmetro principal do processo para que os

demais sejam estabelecidos com base em curvas pré-programadas no software da fonte de soldagem.

Assim sendo, o parâmetro utilizado como base na fonte CMT foi a velocidade de alimentação da tocha. O valor utilizado foi de 3,2 m/min, sendo esse valor próximo ao utilizado por Silva [15] que foi validado por meio de ensaios mecânicos e de estanqueabilidade, atingindo os requisitos mínimos para a operação em indústria de saneamento básico com valores dentro dos estabelecidos nas normas [16]. Então para manter a qualidade, optou-se por manter a um valor próximo ao utilizado para a velocidade de alimentação para manutenção da mesma taxa de deposição.

Com base na velocidade de alimentação de 3,2 m/min, a fonte estabeleceu o valor de 120 A e 13,6 V para a corrente elétrica e a tensão respectivamente. Além disso, foi adotado uma distância bico de contato-peça (DBCP) de 16 mm e uma velocidade de movimento da tocha de 20 cm/min. Os parâmetros podem ser observados na Tab.1.

Tab.1: Parâmetros empregados

Velocidade de Alimentação do Arame (m/min)	Corrente Elétrica (A)	Tensão (V)	Distância Bico de Contato-Peça (mm)	Velocidade de Movimento da Tocha (cm/min)
3,2	120	13,6	16	20

3.2 Análise da Vazão do Gás de Proteção

Na etapa de análise da influência da vazão do gás de proteção, foi confeccionado 1 espécime cilíndrico com 40 mm de diâmetro externo e 24,3 mm de diâmetro interno, utilizando os mesmos parâmetros da Tab.1. Após a fabricação, foi retirada 1 fatia com 10 mm de espessura para quantificar a presença de defeitos internos. As fatias foram retiradas utilizando uma cortadora metalográfica Fortel CFIII. Posteriormente, foi realizada a análise de defeitos internos presentes nas fatias por meio de uma máquina de tomografia e ultrassom BOSELLO SRE MAX 80-150 (ZEISS). A partir do resultado da análise, foi decidido se havia a necessidade ou não da alteração da vazão do gás de proteção. A representação do corte realizado pode ser visualizada na Figura 1.

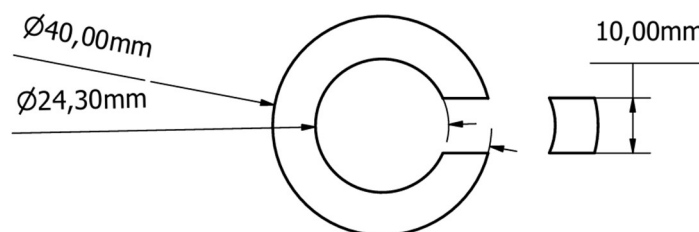


Figura 1: Representação do corte

3.3 Ensaio de Tração

Com base nos resultados da análise do gás de proteção, foi selecionada a menor vazão que indicou não haver a presença de defeitos internos nas fatias analisadas. Foi fabricado um tubo com 300 mm de comprimento, 40 mm de diâmetro externo e 24,3 mm de diâmetro interno.

Para a realização do ensaio de tração, foi utilizada a norma ASTM A370 [17] que estabelece as condições para a realização de ensaios mecânicos em produtos feitos de Aço. Com base na norma, foram confeccionados plugues responsáveis por induzir, durante a realização do ensaio, a ruptura do tubo na porção central denominada de *Gage Length*, que possui 50 mm de comprimento. Uma representação do tubo com os plugues e as dimensões dos plugues fabricados podem ser visualizadas nas Figura 2 e Figura 3 respectivamente.

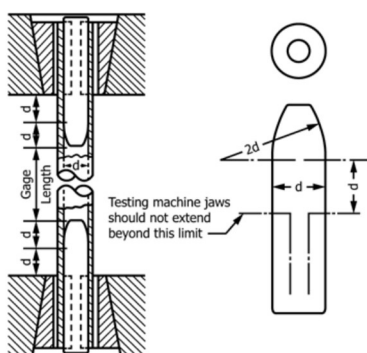


Figura 2: Representação do tubo com plugue [17]

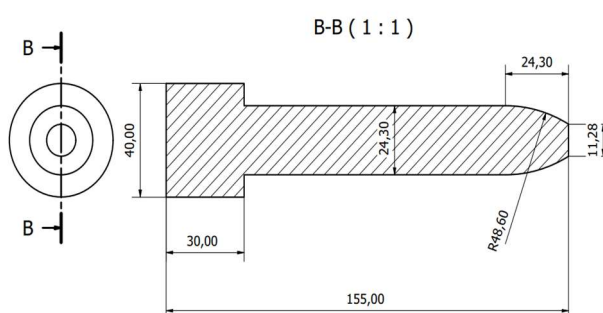


Figura 3: Dimensões dos plugues confeccionados

Para a realização do ensaio, foi utilizada uma máquina universal de Ensaios Shimadzu UHF-600KNX. O ensaio foi realizado até a ruptura do tubo fabricado por CMT e os resultados obtidos foram comparados com os relatados por Silva [15] para um tubo fabricado por GMAW.

Posteriormente, foi averiguado se os valores obtidos para o Limite de Escoamento e o Limite de Resistência a Tração do tubo satisfazem os critérios estabelecidos pela norma ABNT NBR 5590 [16].

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Análise da Vazão do Gás de Proteção.

A partir de uma análise qualitativa, foi possível concluir que o espécime fabricado apresentou acabamento homogêneo ao longo da sua geometria, não havendo a presença de defeitos externos que podem ser apresentados no processo WAAM como falta de fusão entre as camadas, colapso da poça de fusão ou até mesmo inclusão de ar atmosférico. Além disso, após o corte e retirada da fatia, foi possível observar que as camadas não apresentavam falta de fusão entre as camadas. O espécime e a fatia retirada podem ser observados na Figura 4 e Figura 5.

A partir da visualização da fatia no tomógrafo BOSELLO SRE MAX 80-150 (Figura 6) foi possível observar que a fatia não apresentou presença de poros internos na sua estrutura ou de nenhum outro tipo defeito. Zhang [19] em seu trabalho, utilizando uma vazão de gás de 20 L/min consegue fabricar componentes de aço com a ausência de poros internos. Assim sendo, a parametrização inicial selecionada para a confecção do espécime, incluindo o valor de 20 L/min selecionado para a vazão do gás de proteção, se mostrou eficaz em manter a integridade tanto superficial quanto interna, não precisando a alteração do valor de nenhum parâmetro para a fabricação do tubo.



Figura 4: Vista lateral do espécime



Figura 5: Fatia do espécime



Figura 6: Fatia vista no tomógrafo

4.2 Ensaio de Tração.

Posteriormente a confecção do tubo, foi realizada a usinagem do mesmo para a realização do ensaio mecânico de tração. Simultaneamente a este processo, foram confeccionados 2 plugues de Ferro Fundido a serem utilizados durante o ensaio de tração para assim induzir a ruptura do tubo na região do *Gage Length*. O tubo pós processado, juntamente aos plugues podem ser visualizados na Figura 7.



Figura 7: Tubo e plugues do ensaio

A Figura 8 mostra um gráfico do Limite de Escoamento e o Limite de Resistência a Tração obtidos para o tubo feito por CMT. Os valores obtidos para ambas as propriedades foram de 385,69 MPa e 426,15 MPa. Segundo a norma ABNT NBR 5590 [16], os valores mínimos permitidos para componentes fabricados com material de grau B são de 240 MPa para o limite de escoamento e 415 MPa para o limite de resistência a tração, sendo assim, o tubo se mostra dentro dos conformes estabelecidos pela norma.

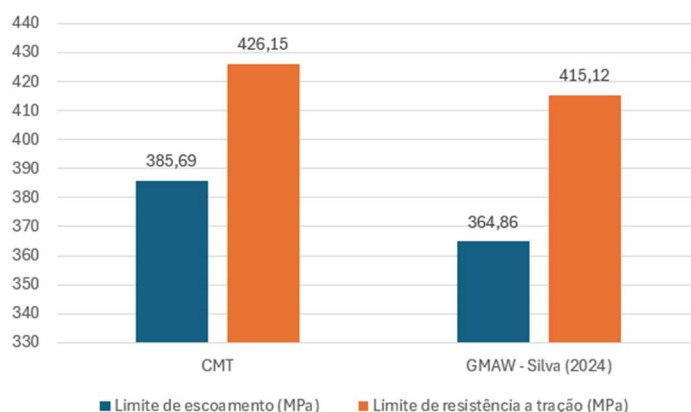


Figura 8: Gráfico comparativo das propriedades obtidas no Ensaio de Tração CMT x GMAW [15]

Os valores obtidos no ensaio de tração em um tubo similar fabricado por GMAW por Silva [15] foram de 364,86 MPa para o limite de escoamento e 415,12 MPa para o limite de resistência a tração, sendo os valores de ambas as propriedades inferiores aos obtidos para o processo CMT. Comparando diretamente os valores do ensaio com os de Silva [15], é possível afirmar que o processo CMT se mostrou capaz de fabricar componentes com resistência mecânica maior comparado ao processo GMAW. Nagasai [19] ao comparar as propriedades mecânicas obtidas em um ensaio de tração de componentes cilíndricos fabricados por CMT e GMAW, também observou valores maiores para o limite de escoamento e limite de resistência a tração no componente cilíndrico fabricado por CMT comparado ao componente fabricado por GMAW. Nunes e Vandermeiren [20] em seu trabalho comparam as propriedades obtidas em ensaios mecânicos em amostras extraídas de uma parede confeccionada por CMT com os valores reportados na literatura e relatam valores para o limite de escoamento e limite de resistência a tração acima dos mencionados para o GMAW na literatura.

A partir disso, é possível afirmar que o processo CMT se mostra uma alternativa viável para a fabricação de componentes e um processo capaz de fabricar componentes com resistência maior comparados aos componentes fabricados por GMAW.

5 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos durante a realização das atividades se mostraram satisfatórios e dentro do esperado. A partir das atividades relatadas no trabalho é possível estabelecer as seguintes conclusões:

- Os parâmetros empregados no processo, especialmente para a vazão do gás de proteção de 20 L/min, se mostraram validados para a fabricação de componentes no processo CMT isentos de defeitos internos.
- O tubo fabricado pelo processo CMT se mostrou viável para aplicações sujeitas a esforços mecânicos, atingindo os requisitos mínimos estabelecidos pela norma ABNT NBR 5590.
- O processo CMT se mostrou uma alternativa melhor que o processo GMAW para a fabricação de componentes, quanto as propriedades de resistência mecânica atingindo os valores de 385,69 MPa para o limite de escoamento e 426,15 MPa, ambos os valores maiores que os reportados pela literatura.

Agradecimentos. Agradecemos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo auxílio de bolsa de iniciação científica, à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG) pelo suporte financeiro (202410267000182) para aquisição da fonte Frônius-CMT, à Pró-Reitoria de Pesquisa e Inovação da Universidade Federal de Goiás (PRPI/UFG) e à Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC/UFG) pelo auxílio e disponibilização laboratorial para a pesquisa na área de Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA), ao Centro de Excelência em Metrologia SENAI-ZEISS pelo o auxílio prestado na análise por tomografia e aos técnicos(a) de laboratório Fleide William Rodrigues Alves, João Bosco da Cunha e Renata Rodrigues Alves.

REFERÊNCIAS

- [1] RAUT, Laukik P.; TAIWADE, Ravindra V. **Wire Arc Additive Manufacturing: A Comprehensive Review and Research Directions.** *Journal of Materials Engineering and Performance*, Nova Iorque, v. 30, n. 7, p. 4768-4791, jul. 2021. DOI:10.1007/s11665-021-05871-5.
- [2] KAWALKAR, R.; DUBEY, H. K.; LOKHANDE, S. P. Wire arc additive manufacturing: A brief review on advancements in addressing industrial challenges incurred with processing metallic alloys. *Materials Today: Proceedings*, v. 50, p. 1971-1978, 2022. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.07.350.
- [3] SELVI, S.; VISHVAKSENAN, A.; RAJASEKAR, E. **Cold metal transfer (CMT) technology - an overview.** *Defence Technology*, v. 14, n. 1, p. 28-44, 2018. DOI:10.1016/j.dt.2017.08.002.
- [4] Stinson, H.; Ward, R.; Quinn, J.; McGarrigle, C. **Comparison of Properties and Bead Geometry in MIG and CMT Single Layer Samples for WAAM Applications.** *Metals*, v. 11, n. 10, p. 1-18, 2021. DOI: 10.3390/met11101530.
- [5] ZHANG, X.; LIU, Y.; WANG, J.; et al. **Comparative study of microstructural and mechanical properties of robotic CMT and GMAW welded 7475-T7351 aluminium alloy joints.** *Materials Today Communications*, v. 37, p. 106994, 2023. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2023.106994
- [6] KESARWANI, S.; YUVARAJ, N.; NIRANJAN, M. S. **CMT-based WAAM: a comprehensive review of process parameters, their effects, challenges, and future scope.** *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v. 46, p. 699, 2024. DOI:10.1007/s40430-024-05276-0.
- [7] JAFARI, D.; WAINER, E.; WANG, Y.; WATSON, J. **Wire and arc additive manufacturing: a review on recent progress and challenges.** *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, [S. l.], v. 102, p. 389–403, 2019. DOI:10.1007/s00170-018-03279-7.
- [8] BELLAMKONDA, P. N.; KUMAR, S.; KUMAR, A.; et al. **Cold metal transfer technology: A review of recent research developments.** *Materials Today Communications*, v. 37, p. 106994, 2024. DOI: 10.1016/j.rineng.2024.102423.
- [9] KARIMI, Javad; ZHAO, Chao et al. **Revealing the mechanism of cold metal transfer.** *Communications Engineering*, [S. l.], v. 4, art. 39, 2025. DOI: 10.1038/s44172-025-00378-6.
- [10] GOU, Jian; SHEN, Junqi; HU, Shengsun; TIAN, Yinbao; LIANG, Ying. Microstructure and mechanical properties of as-built and heat-treated Ti-6Al-4V alloy prepared by cold metal transfer additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Processes*, v. 42, p. 41-50, jun. 2019. DOI: 10.1016/j.jmapro.2019.04.012.
- [11] KARIMI, Mohammad Reza; WANG, Sheng-Hui; JELOVICA, Jasmin. **Taguchi-based experimental investigation into weld cladding of Ni-WC MMC overlays by CMT process.** *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 122, p. 2433-2461, set. 2022. DOI: 10.1007/s00170-022-09816-7.
- [12] LEHMANN, T.; JAIN, A.; JAIN, Y.; STAINER, H.; WOLFE, T.; HENEIN, H.; QURESHI, A. J. Concurrent geometry- and material-based process identification and optimization for robotic CMT-based wire arc additive

manufacturing. *Materials & Design*, v. 194, art. 108841, 2020. DOI: 10.1016/j.matdes.2020.108841.

[13] DUTRA, J. C.; GONÇALVES E SILVA, R. H.; MARQUES, C. **Características de fusão e potência de soldagem com a transferência MIG – CMT versus MIG convencional para Alumínio 5183**. *Welding International*, v. 29, n. 3, p. 181–186, 2015. DOI: 10.1080/09507116.2014.932974.

[14] TERRENOIR, L.; JAIN, A.; JAIN, Y.; STAINER, H.; WOLFE, T.; HENEIN, H.; QURESHI, A. J. **Influence of wire feed speed and torch speed on the mechanical properties of wire arc additively manufactured stainless steel**. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, v. 145, n. 10, art. 101012, 2023. DOI: 10.1115/1.4059889.

[15] SILVA, L. L. Avaliação da Aplicabilidade da Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA) para Produção de Tubo de Aço Aplicado em Transporte de Cloro. 2024. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2024. Disponível em: repositorio.bc.ufg.br/tede/handle/tede/13824.

[16] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 5590:2015 – **Tubos de aço-carbono com ou sem solda longitudinal, pretos ou galvanizados – Requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

[17] ASTM INTERNATIONAL. ASTM A370 – Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2020.

[18] Zhang, Y.; Chen, C.; Wang, C.; Xiong, R.; Zhang, K. **Effect of shielding gas on keyhole stability and pores in laser-CMT hybrid welding of ultra-high strength steel**. *Journal of Manufacturing Processes*, v. 74, p. 948-962, 2024. DOI: 10.1016/j.jmapro.2024.11.042.

[19] NAGASAI, B. P.; MALARVIZHI, S.; BALASUBRAMANIAN, V. Effect of welding processes on mechanical and metallurgical characteristics of carbon steel cylindrical components made by wire arc additive manufacturing (WAAM) technique. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, v. 36, p. 100–116, 2022. DOI: 10.1016/j.cirpj.2021.11.005.

[20] NUNES, R.; VANDERMEIREN, N.; VERLINDE, W.; BORUAH, D.; MOTTE, R.; DE WAELE, W. A benchmark of mechanical properties and operational parameters of different steel filler metals for wire arc additive manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 127, p. 599–613, 2023. DOI: 10.1007/s00170-023-11520-z.

ANÁLISE DE ESTABILIDADE E ACURÁCIA DOS MÉTODOS θ EM EDOS

¹ Arquimedes A. Junior, ² Thyago M. L. Silva, ² Andreia A. Nascimento

¹ Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária (PPGEAS), Escola de Engenharia Engenharia Civil e Ambiental (EECA), Universidade Federal de Goiás (UFG) Avenida Universitária, Quadra 86, Lote Área 1488. Setor Leste Universitário, CEP: 74605-220, Goiânia, Goiás, Brasil

² Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGMEC), Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC), Universidade Federal de Goiás (UFG). Av. Esperança, s/n, Campus Samambaia, CEP: 74.690-900, Goiânia, Goiás, Brasil

arquimedes@discente.ufg.br, thyagomarinho@discente.ufg.br, aanascimento@ufg.br

DOI: 10.5281/zenodo.19041132

Resumo. No presente trabalho analisa-se a estabilidade e a acurácia dos métodos θ aplicados à integração numérica de equações diferenciais ordinárias (EDOs) de primeira ordem. Para essa avaliação, adotou-se como equação-teste o sistema massa–mola ideal, que possui solução analítica conhecida e permite comparar diretamente os resultados numéricos. O modelo foi formulado em termos de variáveis de estado e discretizado pelo método θ , gerando um sistema linear de duas equações a cada passo temporal. Foram simulados os casos $\theta = 0$ (Euler explícito), $\theta = 0,5$ (Crank–Nicolson) e $\theta = 1$ (Euler implícito), com o objetivo de examinar o efeito do parâmetro θ sobre a estabilidade e a acurácia da solução. Com os resultados obtidos mostra-se que o método de Euler explícito apresenta amplificação artificial da amplitude, enquanto o Euler implícito promove dissipação numérica. O método de Crank–Nicolson, por sua vez, manteve excelente concordância com a solução analítica, preservando amplitude e fase ao longo do tempo. A análise do erro em função de θ indicou o mínimo próximo de 0,5, como aquele que tem menor erro entre o modelo numérico e analítico. Conclui-se que o método de Crank–Nicolson constitui a escolha mais adequada para sistemas oscilatórios não amortecidos, nos quais a preservação da amplitude de oscilação é essencial.

Palavras-chave: Avanço temporal; Métodos numéricos; Estabilidade numérica; Método θ .

1 INTRODUÇÃO

As equações diferenciais ordinárias (EDOs) de primeira ordem, em geral apresentadas como problemas de valor inicial (PVI), podem ser escritas na seguinte forma:

$$\frac{du}{dt} = f(t, u), \quad u(0) = u_0. \quad (1)$$

Essas equações são fundamentais na modelagem matemática de fenômenos em diversas áreas do conhecimento, tais como física, química e engenharia. Entretanto, a maioria das EDOs não admitem solução analítica fechada, o que torna necessário o emprego de algoritmos numéricos para aproximar suas soluções de confiável (FARAGÓ, 2013).

Entre os diversos métodos disponíveis, destacam-se o Método θ , também conhecido como θ -método. Trata-se de uma família de esquemas de passo único que generalizam os métodos de Euler explícito e implícito por meio de um parâmetro $\theta \in [0, 1]$, Eq. 2.

$$y_{n+1} = y_n + \Delta t \left[(1 - \theta) f(t_n, y_n) + \theta f(t_{n+1}, y_{n+1}) \right], \quad (2)$$

em que Δt representa o incremento temporal, $y_n \approx y(t_n)$ i.e., variável no tempo anterior, e $y_{n+1} \approx y(t_{n+1})$ variável no tempo atual.

De acordo com Tian e Kuang (1995) o método θ pode também ser interpretado como a forma mais simples da família de métodos de Runge–Kutta de passo único. A escolha do parâmetro θ impacta diretamente nas propriedades de consistência, estabilidade e convergência, que são essenciais para a aplicação segura em problemas de modelagem matemática.

Faragó (2013) mostrou que é possível determinar de maneira direta a constante de estabilidade do método θ no caso escalar, garantindo a convergência. Tian e Kuang (1995) estenderam a análise de estabilidade para equações diferenciais com atraso, evidenciando que valores para $\theta \geq 0,5$, o método apresenta uma região de estabilidade ampliada

O método θ é uma técnica numérica utilizada para resolver equações diferenciais, servindo como uma generalização de abordagens clássicas. Estudos recentes, como os de Hurl, Siddiqua e Xu (2023), têm explorado a combinação deste método com filtros temporais para aprimorar simultaneamente a estabilidade e a acurácia. Além disso, trabalhos como o de Tian e Kuang (1995) já destacavam a importância da escolha do parâmetro θ para encontrar o equilíbrio ideal entre robustez e erro numérico.

A seleção de θ define as características da simulação: para $\theta = 0$, tem-se o método de Euler Explícito, que é rápido, mas requer passos de tempo pequenos para ser estável; para $\theta = 1$,

obtem-se o Euler Implícito, que é incondicionalmente estável, mas de implementação mais difícil; e para $\Theta = 0,5$, o método de Crank-Nicolson (ou Regra do Trapézio) oferece um balanço entre acurácia e estabilidade. Para avaliar essas diferenças na prática, o método foi aplicado a um sistema físico simples (massa-mola), que possui uma solução exata conhecida e cuja formulação é apresentada na Seção de Metodologia.

Diante disso, o presente estudo tem como principais objetivos: (i) formular o problema do sistema massa-mola em formato matricial; (ii) implementar a solução numérica usando o método Θ para os casos $\Theta = 0$, $\Theta = 0,5$ e $\Theta = 1$; (iii) comparar os resultados obtidos com a solução analítica para quantificar o erro de cada abordagem; e, por fim, (iv) identificar qual configuração do método apresenta a maior robustez numérica, oferecendo subsídios para a escolha do esquema mais adequado em problemas de sistemas oscilatórios.

2 METODOLOGIA

2.1 Modelo Físico

O sistema massa-mola, Figura 1, consiste em um corpo de massa $m = 1,0$ kg concentrada em um único ponto, ou seja, suas dimensões não influenciam na análise. Assume-se que a mola, a qual está presa ao corpo, seja ideal e tenha rigidez $k = 10$ N/m, obedecendo estritamente à Lei de Hooke. Considera-se um movimento unidimensional e puramente translacional, desprezando a presença de atrito viscoso e eliminando qualquer forma de amortecimento.

As forças que atuam no sistema são mostradas na Figura 1, onde F_p é a força peso no sentido positivo do deslocamento e F_e é a força elástica que sempre atua em sentido contrário.

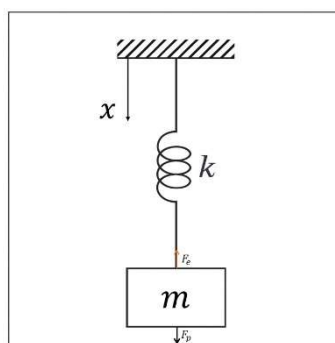


Figura 1: Esquemático do sistema massa-mola (RAO, 2008)

O corpo então realiza oscilações em torno de uma posição de equilíbrio estável, movendo-se periodicamente para cima e para baixo de forma contínua. A força elástica da mola atua sempre

no sentido oposto ao deslocamento, garantindo que a massa não permaneça afastada da posição de equilíbrio. Na ausência de amortecimento por atrito ou resistência do ar, o movimento oscilatório se mantém indefinidamente, mantendo a amplitude constante e repetição regular ao longo do tempo. Esse tipo de comportamento é caracterizado pela manutenção da amplitude das oscilações ao longo da trajetória.

2.2 Modelo Matemático

A partir da descrição física do sistema, pode-se agora estabelecer o modelo matemático que representa o movimento da massa. Para isso, aplica-se a Segunda Lei de Newton ao corpo, relacionando a resultante das forças atuantes ao produto da massa pela sua aceleração.

A equação diferencial, Eq.3, onde massa m conectada a uma mola de rigidez k , de modo que $m\ddot{x}(t)$ representa a força inercial e $kx(t)$ a força elástica, resulta em uma equação diferencial que descreve o movimento oscilatório. Essa equação, conhecida como equação do movimento vibratório, permite descrever a posição da massa em função do tempo e fornece as bases para a análise das características do sistema, como frequência natural, período e amplitude das oscilações.

$$m\ddot{y}(t) + ky(t) = 0, \quad (3)$$

A solução geral é uma resposta harmônica simples, Eq. 4, em que $\omega_n = \frac{\sqrt{k}}{m} = 3,1623$ rad/s é a frequência natural do sistema, com as condições iniciais $v(0) = 0$ m/s e $y(0) = 0, 1$ m.

$$y(t) = x_0 \cos(\omega_n t) + \frac{v_0}{\omega_n} \sin(\omega_n t) \quad (4)$$

Esse modelo é escolhido por três razões: (i) *simplicidade analítica*, permitindo solução em forma fechada e comparação direta com a solução numérica; (ii) representatividade, pois reproduz de forma similar o comportamento oscilatório de sistemas vibratórios reais, servindo de base para problemas com amortecimento e excitação forçada (RAO, 2008); (iii) sensibilidade numérica, já que a oscilação periódica amplifica desvios acumulados, tornando-o adequado para avaliar acurácia e estabilidade dos métodos de integração temporal.

A Eq. 3 é reescrita como um sistema de equações diferenciais de primeira ordem, introduzindo a variável velocidade: $y'(t) = v(t)$ e $\dot{v}(t) = -y(t)k/m$.

2.3 Modelo Numérico

Para realizar a solução numérica, aplica-se o método θ à equação do movimento, Eq.3. O método θ aproxima as derivadas por diferenças finitas ponderadas, gerando um sistema linear para cada passo de tempo $\Delta t = 0, 01$ s.

Aplicando o método Θ na Eq. 2 tem-se:

$$y_{n+1} = y_n + \Delta t[(1 - \theta)v_n + \theta v_{n+1}] \quad (5)$$

$$v_{n+1} = v_n + \Delta t, \omega_n^2[(1 - \theta)y_n + \theta y_{n+1}] \quad (6)$$

onde as incógnitas são y_{n+1} e v_{n+1} .

Para resolver numericamente o sistema obtido pelo método Θ , é conveniente reorganizar as equações discretizadas em uma forma matricial compacta, Eq.7.

$$\underbrace{\begin{bmatrix} 1 & -\theta\Delta t \\ \theta \frac{k\Delta t}{m} & 1 \end{bmatrix}}_{A(\theta)} \underbrace{\begin{bmatrix} y_{n+1} \\ v_{n+1} \end{bmatrix}}_{b(\theta)} = \underbrace{\begin{bmatrix} y_n + (1 - \theta)\Delta t v_n \\ v_n - (1 - \theta)\frac{k\Delta t}{m} y_n \end{bmatrix}}_{b(\theta)} \quad (7)$$

Essa representação permite aplicar métodos de álgebra linear para resolver x e v a cada passo de tempo. No caso particular da matriz 2×2 , a solução pode ser obtida utilizando a Regra de Cramer (BOLDRIN et al., 1980).

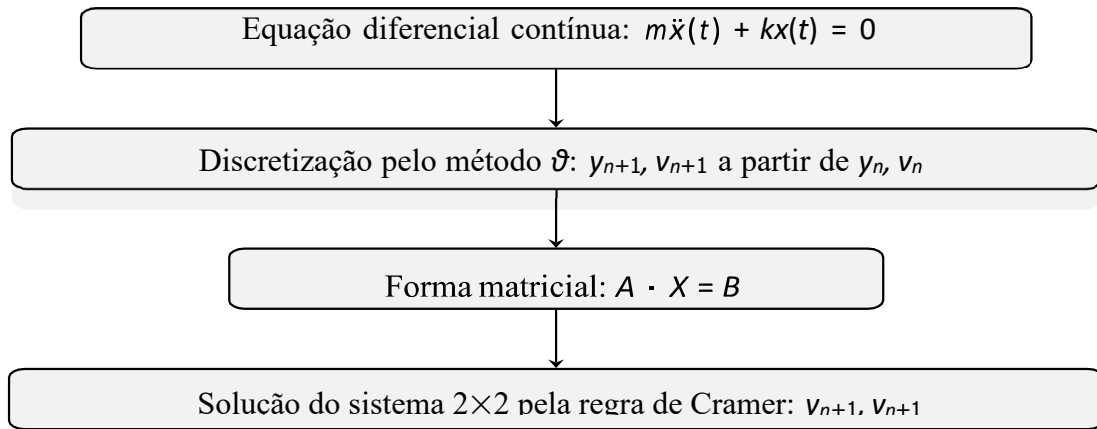
O primeiro passo consiste em calcular o determinante da matriz $A(\theta)$ em (7). Em seguida, substitui-se cada coluna de $A(\theta)$ pelo vetor $b(\theta)$, resultando nos determinantes auxiliares $\det(A_x)$ e $\det(A_y)$. A solução final é obtida como:

$$y_{n+1} = \frac{b_1 + a_{12}b_2}{\det A(\theta)} = \frac{y_n + (1 - \theta)\Delta t v_n - \theta\Delta t \left[v_n - (1 - \theta)\frac{k\Delta t}{m} y_n \right]}{1 - \theta^2 \frac{k}{m} \Delta t^2} \quad (8)$$

$$v_{n+1} = \frac{b_2 + a_{21}b_1}{\det A(\theta)} = \frac{v_n - (1 - \theta)\frac{k\Delta t}{m} y_n - \theta\frac{k\Delta t}{m} [y_n + (1 - \theta)\Delta t v_n]}{1 - \theta^2 \frac{k}{m} \Delta t^2} \quad (9)$$

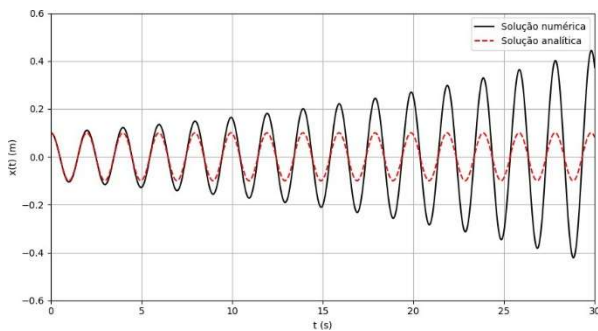
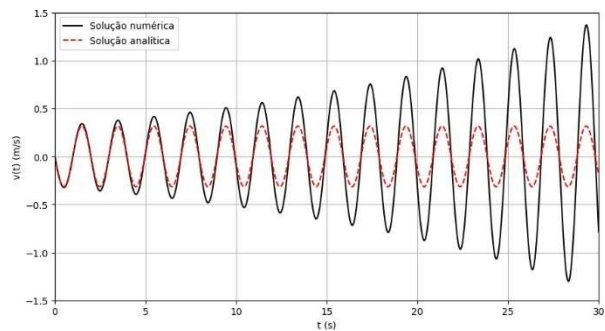
A cada passo, resolve-se $A(\theta)u_{n+1} = b(\theta)$.

O processo completo implementado no código é resumido no fluxograma da Figura 2.


 Figura 2: Fluxo de modelagem numérica pelo método θ .

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados numéricos obtidos permitem avaliar o comportamento do sistema massa–mola para diferentes valores de θ , bem como cada escolha impacta na estabilidade e na acurácia da solução.


 Figura 3: Solução numérica e analítica do deslocamento massa–mola com $\theta = 0$

 Figura 4: Solução numérica e analítica da velocidade massa–mola com $\theta = 0$

Na Figura 3 apresenta-se o deslocamento do corpo ao longo do tempo, para os parâmetros $m = 1$ kg, $k = 10$ N/m, $\Delta t = 0,01$ s e $x_0 = 0,1$ m. A linha preta representa a solução numérica obtida pelo método de Euler explícito ($\theta = 0$), enquanto a linha vermelha tracejada mostra a solução analítica. Observa-se que a amplitude da solução numérica aumenta progressivamente com o tempo, em contraste com a solução analítica, cuja amplitude permanece constante. Esse comportamento decorre do fato de que o método de Euler explícito não preserva a amplitude das oscilações do sistema, acumulando pequenos erros a cada passo de integração. Como resultado, ocorre amplificação artificial da amplitude ao longo do tempo.

Embora o método seja simples e de baixo custo computacional, sua estabilidade é condicional, exigindo passos de tempo pequenos, tipicamente $\Delta t < 2/\omega_n$, o que para este caso corresponde a $\Delta t < 0,63$ s.

Na Figura 4 é mostrada a evolução temporal da velocidade $v(t)$ sob as mesmas condições iniciais e parâmetros físicos. Verifica-se o mesmo padrão observado no deslocamento: a solução numérica (linha preta) apresenta amplificação gradual de amplitude, divergindo da solução analítica (linha vermelha tracejada). Esse comportamento confirma a perda de estabilidade do método quando o passo de tempo não é suficientemente pequeno. Em sistemas oscilatórios, o método de Euler explícito introduz erro de fase e de amplitude, o que explica o descompasso entre as curvas de deslocamento e velocidade ao longo do tempo.

Na Figura 5 mostra-se o comportamento do deslocamento $x(t)$ do sistema massa–mola para $\theta = 0,5$, correspondente ao método de Crank–Nicolson. Observa-se que as curvas numérica e analítica coincidem praticamente em toda a simulação, indicando que o método mantém a amplitude constante ao longo do tempo. Esse resultado evidencia que o esquema preserva a amplitude das oscilações do sistema, não introduzindo aumento nem redução artificial da amplitude.

Essa característica faz do método de Crank–Nicolson uma alternativa altamente estável e acurada para sistemas oscilatórios, pois combina a estabilidade do método implícito com a acurácia de segunda ordem do método trapezoidal. O passo de tempo $\Delta t = 0,01$ s mostrou-se adequado para garantir convergência, sem oscilações numéricas espúrias ou desvios de fase perceptíveis.

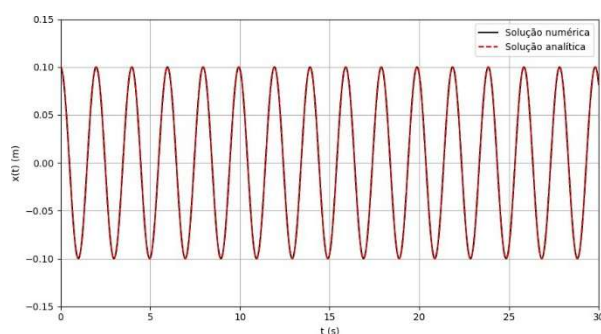


Figura 5: Solução numérica e analítica do deslocamento massa–mola com $\theta = 0,5$

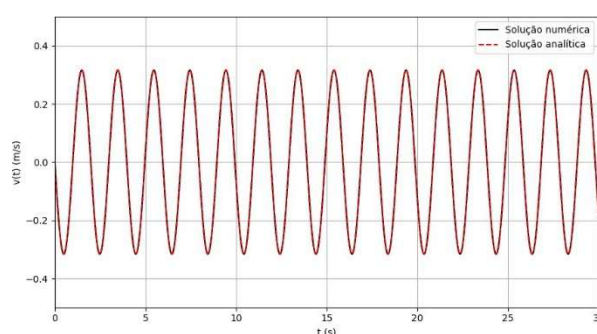


Figura 6: Solução numérica e analítica da velocidade massa-mola $\theta = 0,5$

Apresenta-se na Figura 6 a evolução temporal da velocidade $v(t)$, que também demonstra concordância quase perfeita entre a solução numérica e a analítica. Esse comportamento confirma a estabilidade numérica e a preservação das propriedades físicas do sistema. Embora o método

exija a solução de um pequeno sistema linear a cada passo, o custo computacional adicional é modesto quando comparado ao ganho em acurácia e estabilidade obtido.

Por outro lado, na Figura 7 é evidenciado que, para $\theta = 1$ (método de Euler implícito), a solução apresenta um decaimento gradual da amplitude ao longo do tempo. Embora o método seja incondicionalmente estável para qualquer passo de tempo, ele possui caráter dissipativo, o que provoca a redução artificial da amplitude das oscilações do sistema. Essa dissipação numérica faz com que o movimento oscilatório perca amplitude mesmo na ausência de amortecimento físico, um comportamento artificialmente amortecido, não condizente com o sistema real.

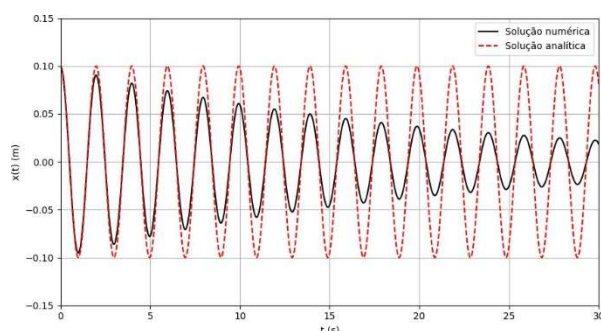


Figura 7: Solução numérica e analítica do deslocamento massa-mola com $\theta = 1$

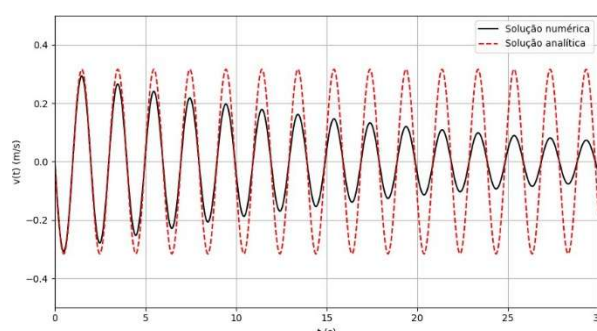


Figura 8: Solução numérica e analítica da velocidade massa-mola com $\theta = 1$

Esse efeito é típico de métodos implicitamente estáveis aplicados a sistemas oscilatórios, nos quais a matriz de integração atua como um filtro numérico de alta frequência. Assim, apesar de garantir estabilidade incondicional, o método de Euler implícito tende a suavizar as oscilações, tornando-o mais apropriado para sistemas rígidos e difusivos, e menos indicado para dinâmicas conservativas como o sistema massa-mola.

Na Figura 8 é mostrada a evolução temporal da velocidade $v(t)$, que apresenta comportamento análogo: o módulo das oscilações reduz-se gradualmente com o tempo, refletindo a dissipação numérica inerente ao esquema implícito. Apesar disso, o método mantém-se estável mesmo para passos de tempo relativamente grandes, o que o torna vantajoso em problemas onde a estabilidade é mais importante que a precisão, como em equações diferenciais rígidas.

Para avaliar a acurácia e a estabilidade dos diferentes esquemas de integração temporal, as Figuras 9 e 10 apresentam, respectivamente, o erro percentual do deslocamento e da velocidade em função do parâmetro θ , considerando o passo de tempo $\Delta t = 0,01$ s.

Na Figura 9, observa-se que o erro mínimo do deslocamento ocorre em torno de $\theta = 0,5$, o que confirma a eficácia do método de Crank-Nicolson em termos de acurácia global. Valores de

$\theta < 0,5$ tendem a introduzir redução artificial da amplitude, enquanto valores de $\theta > 0,5$ produzem aumento artificial da amplitude no sistema. Esse comportamento evidencia que $\theta = 0,5$ representa um ponto de equilíbrio ótimo entre estabilidade e acurácia.

Mostra-se na Figura 10, o erro correspondente à variável velocidade. Nota-se a mesma tendência observada no deslocamento: o erro mínimo é obtido para $\theta \approx 0,5$, indicando que o método Crank–Nicolson oferece melhor desempenho também na integração da variável derivada. Tanto para $\theta = 0$ quanto para $\theta = 1$, os erros aumentam significativamente, refletindo a instabilidade e a dissipação numérica associadas aos métodos de Euler explícito e implícito, respectivamente.

Em síntese, a análise do erro em função de θ permite identificar o regime de maior robustez numérica, isto é, aquele que alia estabilidade, acurácia e consistência dos resultados. Tal análise justifica a adoção do método de Crank-Nicolson como o mais adequado para problemas dinâmicos oscilatórios não amortecidos, nos quais a preservação da amplitude das oscilações e da fase é essencial.

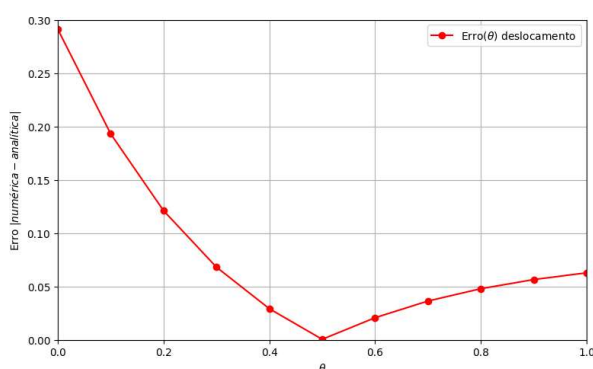


Figura 9: Avaliação do erro do deslocamento em função de θ

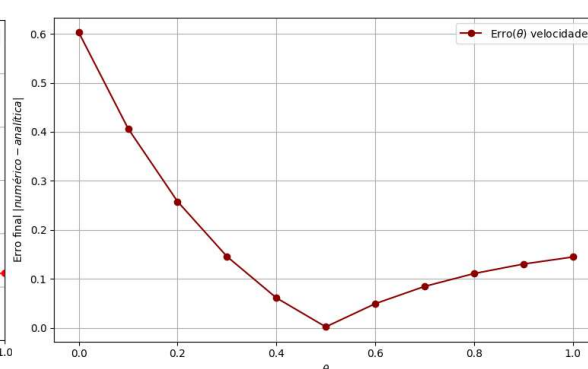


Figura 10: Avaliação do erro da velocidade em função de θ

4 CONCLUSÃO

Este trabalho analisou a aplicação dos métodos θ na integração numérica de EDOs de primeira ordem, tendo como equação-teste o sistema massa–mola ideal. A formulação contínua foi reescrita em variáveis de estado e discretizada pelo método θ , resultando em um sistema linear 2×2 resolvido a cada passo de tempo. A estratégia permitiu comparar, de forma controlada, a solução numérica com a solução analítica e quantificar o efeito do parâmetro θ na acurácia, estabilidade e custo computacional.

Os resultados evidenciaram que o valor de θ determina o comportamento da amplitude das oscilações no esquema temporal. Para $\theta = 0$ (Euler explícito), observou-se amplificação artificial da amplitude das oscilações, com crescimento progressivo de amplitude; para $\theta = 1$ (Euler implícito), verificou-se dissipação numérica, com decaimento não físico da amplitude das oscilações; já para $\theta = 0,5$ (Crank–Nicolson), houve excelente concordância com a solução analítica, preservando amplitude e fase ao longo do tempo. As curvas de erro em função de θ confirmaram o mínimo próximo a $\theta = 0,5$ tanto para deslocamento quanto para velocidade, caracterizando esse esquema como o mais equilibrado entre robustez e acurácia para sistemas oscilatórios não amortecidos.

Como limitações, o estudo considerou um modelo linear sem amortecimento nem excitação, e avaliou apenas três valores de θ sob um conjunto fixo de parâmetros. Trabalhos futuros incluem:

(i) extensão para sistemas com amortecimento e/ou força externa; (ii) análise de não linearidades

e múltiplos graus de liberdade; (iii) varreduras sistemáticas em Δt e θ com critérios adaptativos; e (iv) comparação com integradores de ordem mais alta e que preservem a amplitude. Em síntese, a variação do parâmetro θ mostrou-se uma ferramenta prática para ajustar o balanço entre estabilidade e acurácia, e o método de Crank–Nicolson desponta como escolha recomendada em problemas oscilatórios sem amortecimento.

Agradecimentos. Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio à pesquisa e concessão de bolsas, bem como à Pró-Reitoria de Pós-Graduação (PRPG) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGMEC) pelo suporte institucional e pelas condições fornecidas ao desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- BOLDRIN, J. L. et al. *Álgebra Linear*. 3. ed. São Paulo: Editora Harbra Ltda., 1980. Ampliada e revista. Departamento de Matemática da Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP. ISBN 8529400097.
- FARAGÓ, I. Convergence of the θ -method. *Applied Mathematics*, v. 4, n. 1, p. 9–14, 2013.
- HURL, N.; SIDDIQUA, F.; XU, S. Stability and accuracy analysis of the θ -method and 3-point time filter. *arXiv preprint arXiv:2310.17771*, 2023. Disponível em: <<https://arxiv.org/abs/2310.17771>>.
- RAO, S. S. *Vibrações Mecânicas*. 4. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008. Tradução da 4ª edição em inglês. ISBN 978-85-7605-116-5.
- TIAN, H.; KUANG, J. The stability of the θ -methods in the numerical solution of delay differential equations with several delay terms. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, v. 58, n. 2, p. 171–181, 1995.



V CONGRESSO 20
PPGMEC 25

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

ANÁLISE EXPERIMENTAL DE UM TMD EM VIGAS SUBMETIDAS A ESCOAMENTO: INFLUÊNCIAS DA VELOCIDADE DO VENTO, MASSA E COMPRIMENTO DA RÉGUA

¹ Mauro C. da Silva, ¹ Anderson G. Girardi, ¹ Marlipe G. Fagundes Neto

¹ Universidade Federal de Goiás, Campus Samambaia, Al. Ingá, Prédio B5 Eng. Mecânica

mauro_silva@discente.ufg.br, andersongomes@ufg.br, marlipe@ufg.br

DOI: 10.5281/zenodo.19041199

Resumo. Este trabalho apresenta uma análise experimental do comportamento vibracional de uma viga com massa concentrada submetida ao escoamento de ar em túnel de vento, equipada com um dispositivo de controle passivo do tipo *Tuned Mass Damper* (TMD). Foi adotado um planejamento fatorial completo 3^3 . Foram avaliados os efeitos de três fatores: a velocidade do vento, a massa do TMD e o comprimento da sua régua, e a resposta medida foi a vibração da estrutura, medida por cinco acelerômetros. Os dados de vibração foram processados para cálculo do valor Roots Mean Square (RMS) e analisados estatisticamente por meio de ANOVA. Os resultados demonstraram que a velocidade do vento é o fator de maior influência na resposta dinâmica do sistema, enquanto a massa do TMD apresentou efeito mais relevante próximo à condição ideal de sintonia. A transformação de Box-Cox foi aplicada para estabilização dos resíduos e aproximá-los de uma distribuição normal. A abordagem experimental adotada permitiu compreender o efeito isolado e combinado dos fatores, contribuindo para o melhor dimensionamento de sistemas de controle passivo de vibração.

Palavras-chave: Vibrações mecânicas; Tuned Mass Damper; Planejamento fatorial; ANOVA; Controle passivo.

1 INTRODUÇÃO

Sistemas estruturais submetidos a excitações dinâmicas podem apresentar respostas vibratórias significativas, comprometendo sua integridade, desempenho funcional e vida útil. Vibrações excessivas em estruturas mecânicas e civis não apenas afetam a estabilidade e o conforto, mas também podem induzir falhas por fadiga ou ressonância. Segundo Meirovitch (2001), a análise de vibrações é fundamental no projeto de sistemas dinâmicos, sobretudo em situações em que forças externas, como o escoamento de ar, atuam continuamente sobre a estrutura. Para mitigar essas vibrações excessivas existem as técnicas passivas de controle de vibrações, e dentre elas destaca-se o *Tuned Mass Damper* (TMD), que é um dispositivo composto por uma massa secundária conectada à estrutura principal por uma mola, quando corretamente sintonizado, o TMD absorve parte da energia vibratória reduzindo significativamente a amplitude das oscilações. Conforme explica Rao (2008), o princípio do TMD baseia-se na criação de um sistema adicional de graus de liberdade, no qual a massa secundária redistribui a energia da excitação harmônica, permitindo a redução efetiva da vibração na frequência de interesse, desde que as frequências naturais do sistema principal e do TMD sejam coincidentes. Para a medição precisa de vibração como essas citadas em ensaios experimentais, uma métrica amplamente utilizada é o valor quadrático médio (*Root Mean Square* - RMS), que fornece uma medida estatística da magnitude média de um sinal vibratório ao longo do tempo. O RMS é calculado pela expressão:

$$\text{RMS} = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{1}{T}}^{\frac{1}{T}} x(t)^2 dt, \quad (1)$$

onde $x(t)$ representa o sinal de entrada, essa medida é essencial para quantificar a intensidade da vibração e comparar condições experimentais (MEIROVITCH, 2001).

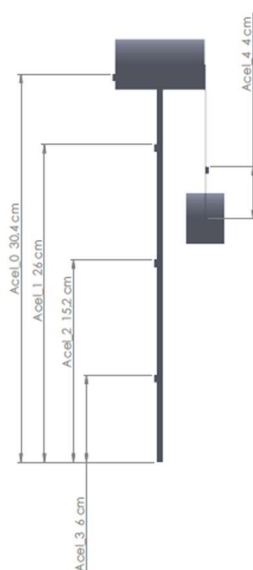
Nesse contexto, o uso de planejamentos experimentais surge como uma ferramenta poderosa para a investigação sistemática de vários fatores simultaneamente. De acordo com Montgomery (2012), o planejamento fatorial possibilita identificar não apenas os efeitos principais de cada fator sobre uma resposta, mas também as interações entre eles, aspecto fundamental em sistemas dinâmicos complexos. O planejamento fatorial completo do tipo 3^3 , por exemplo, permite a análise de três fatores em três níveis, oferecendo uma visão abrangente do comportamento do sistema.

Este trabalho tem como objetivo analisar experimentalmente o comportamento vibratório de uma viga de alumínio com massa concentrada em sua extremidade livre, submetida ao escoamento em túnel de vento e equipada com um TMD. São investigados três fatores principais:

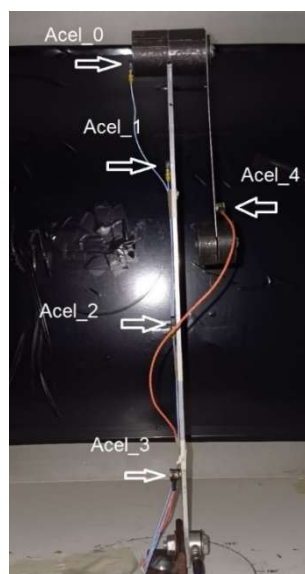
(i) a velocidade do vento, (ii) a massa do TMD (utilizando diferentes materiais), e (iii) o comprimento da régua do TMD. A resposta de vibração do sistema foi avaliada por meio da aceleração RMS (m/s^2), medida por cinco acelerômetros distribuídos ao longo da viga e no próprio TMD. O estudo busca identificar as condições de maior eficiência do TMD e compreender como as variáveis interagem, utilizando uma abordagem estatística baseada em ANOVA.

2 METODOLOGIA

Para a realização do experimento, foi utilizada uma viga de alumínio com uma massa concentrada acoplada à sua extremidade livre com a adição de um dispositivo de controle de vibrações do tipo TMD incorporado a essa massa. O sistema completo foi fixado no interior de um túnel de vento, sendo submetido a diferentes velocidades de escoamento do ar. Já a instrumentação empregada no experimento contou com cinco acelerômetros sendo três distribuídos ao longo do comprimento da viga, um colocado no topo, na massa concentrada e um instalado diretamente no sistema TMD. A Figura 1 apresenta o arranjo experimental, destacando também as localizações dos sensores.



(a) Esquema Planejado



(b) Esquema Montado no Túnel de Vento

Figura 1 - Montagem do aparato experimental. Fonte: Próprio Autor

Para a aquisição dos sinais de vibração, foram utilizadas duas placas de aquisição de dados da marca *National Instruments*, modelo NI 9234, em que cada placa possui quatro canais de entrada simultâneos, com capacidade de amostragem de até 51,2 kS/s por canal, o que possibilita

a captura de sinais de alta frequência com boa qualidade. As placas foram conectadas a um notebook, responsável pela configuração e armazenamento dos dados adquiridos. A coleta dos dados foi realizada por meio do *software LabVIEW Community Edition*, utilizando programação gráfica por blocos, onde a rotina desenvolvida permitiu a aquisição simultânea dos cinco sinais de vibração a uma frequência de amostragem de 1000 Hz, com a gravação de 10.000 pontos por canal. Posteriormente, os sinais foram processados para o cálculo do valor RMS de cada resposta, sendo esta a principal métrica adotada para análise dos resultados. Cabe destacar que em cada aquisição dos dados realizada no experimento foi iniciada aproximadamente um minuto após a ativação do túnel de vento, garantindo a estabilização do escoamento e das vibrações no sistema.

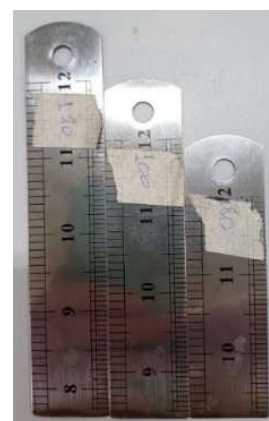
O experimento seguiu um planejamento fatorial do tipo 3^3 , com três fatores e três níveis cada totalizando 27 combinações distintas entre os fatores investigados. Os fatores analisados foram:

- Velocidade do vento: 5, 7,5 e 10 m/s;
- **Comprimento do TMD:** 80, 100 e 120 mm;
- **Massa do TMD:** três corpos de mesmo volume, mas confeccionados com diferentes materiais sendo eles tecnil, alumínio e ferro fundido, com massas respectivas de 18,68 g, 40,54 g e 98,81 g.

Na figura 2 estão explicitadas as massas e as réguas que foram utilizadas para o arranjo do TMD.



(a) Massas



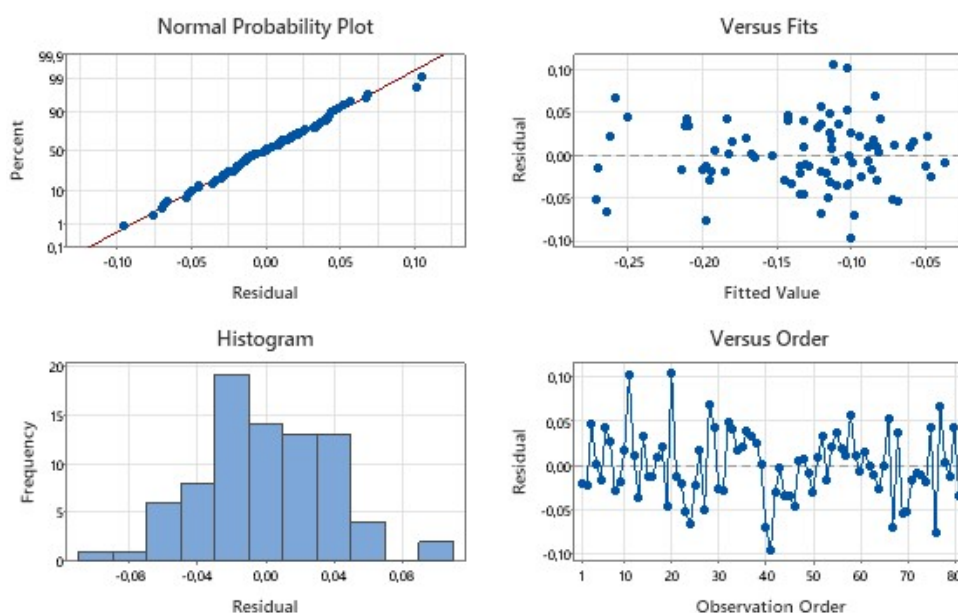
(b) Réguas

Figura 2 – Massa e tamanho das réguas. Fonte: Próprio Autor

Para garantir a repetibilidade dos resultados e permitir a análise da variabilidade experimental, cada combinação foi realizada com três réplicas. Essas réplicas foram organizadas em blocos para minimizar interferências externas, como variações ambientais ou flutuações no comportamento do túnel de vento ao longo do tempo. Com isso, foram realizadas ao todo 81 execuções experimentais, feitas de forma aleatória, onde em cada troca de combinação das massas e régua, o sistema foi preso utilizando uma parafusadeira, com o intuito de que em todas as execuções fossem feitas da mesma maneira. Já para realizar esse planejamento fatorial foi utilizado como auxílio o *software Minitab* e parte inferior do formulário após a coleta dos valores pelo *LabVIEW* se calculou o RMS dos dados obtidos em cada execução, com auxílio de um script no *software Octave* para que, em seguida, os dados fossem analisados utilizando o *Minitab*.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O primeiro passo da análise consistiu na avaliação dos resíduos das respostas obtidas por cada um dos cinco acelerômetros, no qual inicialmente, observou-se que os resíduos em todos os 5 casos apresentavam comportamento inadequado para análise estatística, com desvios evidentes em relação à normalidade e a presença de tendências sistemáticas. Esse comportamento é exemplificado na figura 3 (a), que ilustra os resíduos correspondentes ao acelerômetro 0. Diante dessas não conformidades, foi aplicada a transformação de Box-Cox em todos os 5 casos, com o objetivo de estabilizar a variância e aproximar os dados de uma distribuição normal. Após a transformação, constatou-se uma melhora significativa no comportamento dos resíduos, como demonstrado na figura 3 (b), os quais passaram a apresentar maior aleatoriedade e aderência à normalidade, tornando os dados mais adequados para as análises posteriores.



(a) Resíduos antes de transformar

(b) Resíduos após transformar

Figura 3 – Resíduos dos dados do acelerômetro 0. Fonte: Próprio Autor

A etapa seguinte da análise consistiu na aplicação da ANOVA (Análise de Variância) aos valores de RMS coletados pelo Acelerômetro 0, posicionado na massa concentrada na extremidade livre da viga. Na matriz apresentada na Figura 4, os fatores A, B e C representam, respectivamente, a velocidade do vento (m/s), a massa do TMD (g) e o comprimento da régua do TMD (mm).

Analysis of Variance for Transformed Response

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	28	0,258251	0,009223	4,01	0,000
Blocks	2	0,003020	0,001510	0,66	0,523
Linear	6	0,192023	0,032004	13,92	0,000
A	2	0,175192	0,087596	38,11	0,000
B	2	0,009910	0,004955	2,16	0,126
C	2	0,006921	0,003460	1,51	0,231
2-Way Interactions	12	0,053360	0,004447	1,93	0,051
A*B	4	0,011101	0,002775	1,21	0,319
A*C	4	0,039045	0,009761	4,25	0,005
B*C	4	0,003215	0,000804	0,35	0,843
3-Way Interactions	8	0,009848	0,001231	0,54	0,824
A*B*C	8	0,009848	0,001231	0,54	0,824
Error	52	0,119526	0,002299		
Total	80	0,377777			

Figura 4 – ANOVA acelerômetro 0. Fonte: Próprio Autor

Com base nos valores de *p-value*, verificou-se que apenas o fator A (velocidade do vento) e a interação A*C (velocidade do vento × comprimento da régua) apresentaram significância estatística ao nível de 5% ($p < 0,05$), indicando que essas variáveis têm influência direta na resposta vibracional da extremidade da viga.

Os fatores B (massa do TMD), e C (comprimento da régua) bem como as demais interações de segunda e terceira ordem, não se mostraram estatisticamente significativos, isso sugere que, sob as condições testadas, alterações isoladas na massa ou no comprimento do TMD não são suficientes para provocar mudanças expressivas na aceleração medida nesse ponto específico da estrutura. A significância da interação entre velocidade e comprimento, por outro lado, reforça a ideia de que a eficácia do TMD depende do regime dinâmico imposto pelo escoamento, ou seja, certas combinações de velocidade e geometria do TMD potencializam ou enfraquecem sua capacidade de controle vibracional. Além disso, o valor de *p-value* para o fator “Blocos” foi alto

(0,523), indicando que a blocagem das réplicas não teve efeito significativo neste modelo. Finalmente, o coeficiente de determinação ajustado (R^2 ajustado) do modelo foi de 51,32%, o que demonstra uma capacidade moderada de explicar a variabilidade dos dados, isso significa que quase metade da variabilidade da resposta vibracional permanece não explicada, possivelmente devido a fatores não controlados ou à presença de ruído experimental, apontando para limitações na modelagem estatística do comportamento dinâmico neste ponto específico da viga.

A Tabela 1 apresenta o resumo da ANOVA para os demais acelerômetros 1, 2, 3 e 4, posicionados ao longo do comprimento da viga e no TMD, respectivamente. Os valores de p -value foram utilizados para avaliar a significância estatística de cada fator e de suas interações, além de indicar a qualidade de ajuste de cada modelo por meio da última coluna.

Tabela 1 – Resultados da ANOVA

Fonte	Blocos	P-value							Ajuste R^2
		A	B	C	A*B	A*C	B*C	A*B*C	
Acel_0	0,52	0,00..	0,13	0,23	0,32	0,005	0,84	0,82	51,32%
Acel_1	0,02	0,00...	0,00...	0,04	0,03	0,37	0,02	0,002	85,43%
Acel_2	0,19	0,00...	0,00...	0,0008	0,45	0,10	0,13	0,0006	86,36%
Acel_3	0,002	0,00...	0,02	0,0001	0,74	0,52	0,33	0,24	86,17%
Acel_4	0,35	0,00...	0,00...	0,00...	0,03	0,06	0,06	0,04	81,50%

Fonte: O Autor

Primeiramente, observa-se que o fator blocagem apresentou significância estatística para os acelerômetros 1 e 3, com p -values menores que 0,05, esse resultado confirma a importância da blocagem na redução de variabilidades não controladas ao longo das repetições experimentais, o que reforça a validade do delineamento experimental adotado. Já para os acelerômetros 2 e 4, a blocagem não apresentou significância, indicando que, nessas posições, as condições de execução foram mais homogêneas ou menos suscetíveis a variações externas.

Em relação aos efeitos principais (A, B e C), todos se mostraram significativos para os quatro acelerômetros, isso mostra que a resposta vibracional é fortemente sensível à variação da velocidade do vento, massa do TMD e comprimento da régua. De forma geral, o fator A (velocidade do vento) apresentou p -values extremamente baixos (menores que 0,0001) para todos os sensores, confirmando seu papel dominante na excitação vibracional do sistema.

As interações de segunda ordem apresentaram comportamento variado, em que para o acelerômetro 1, as interações AB e BC foram significativas, enquanto AC não apresentou significância. No acelerômetro 2, apenas a interação tripla (ABC) mostrou significância, sugerindo um padrão dinâmico complexo na região intermediária da viga, com forte dependência de combinações específicas dos três fatores. No acelerômetro 3, nenhuma interação apresentou significância estatística, possivelmente pela menor amplitude de vibrações próxima ao engaste. Por fim, o acelerômetro 4 apresentou significância para quase todas as interações principais, exceto AC e BC, reforçando a natureza altamente dependente do TMD em relação à combinação dos fatores.

Os valores de ajuste dos modelos variaram entre 81,5% e 86,4%, o que indica boa capacidade de explicação da variabilidade dos dados pelas variáveis incluídas na ANOVA, esses resultados demonstram consistência na análise estatística e fortalecem as conclusões sobre a influência dos fatores e suas interações na resposta vibracional do sistema. A última análise a ser realizada é relacionada aos gráficos dos efeitos de cada um dos fatores analisados nesse trabalho.

Ao analisar a figura 4, o gráfico de efeitos principais mostra que a velocidade do vento exerce uma influência significativa sobre a resposta vibracional em todos os acelerômetros, com aumento contínuo da aceleração RMS conforme a velocidade cresce de 5 m/s para 10 m/s, onde a maior influência ocorre no acelerômetro 4, do TMD, indicando que o dispositivo absorve vibrações mais intensas à medida que a excitação aerodinâmica aumenta, além disso esse resultado confirma que o escoamento aerodinâmico é o principal fator de excitação do sistema, alinhado aos achados da ANOVA.

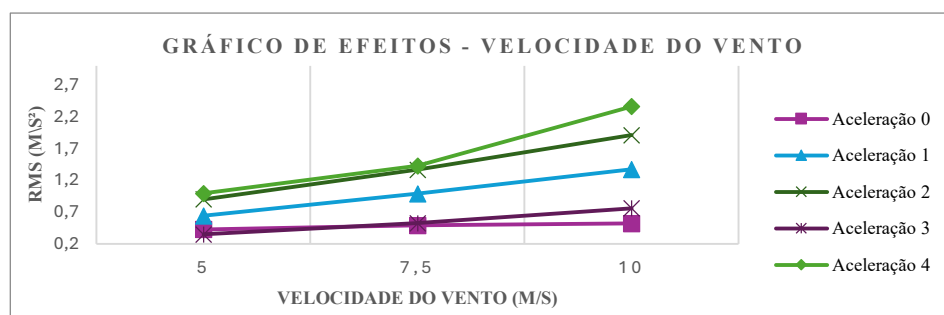


Figura 5 – Efeitos da velocidade do vento. Fonte: Próprio Autor

Observando o gráfico da figura 5, nota-se que a resposta vibracional (RMS) para a maioria dos acelerômetros que estão na viga apresentam um valor menor quando a massa do TMD é de aproximadamente 40,54 g, e isso sugere que esta massa oferece uma condição de sintonia mais eficiente, resultando em menor amplitude de vibração em alguns pontos da estrutura. Além disso, para as massas menores (18,68 g) e maiores (98,81 g), observa-se um aumento da resposta RMS em alguns acelerômetros, indicando que a sintonia do TMD se deteriora, seja por massa insuficiente para absorver energia (massa menor) ou por possíveis efeitos de acoplamento desfavorável (massa maior), assim, o gráfico reforça que o ajuste da massa do TMD influencia diretamente sua eficácia, sendo a massa intermediária a que apresentou melhor desempenho global na redução de vibrações do sistema.

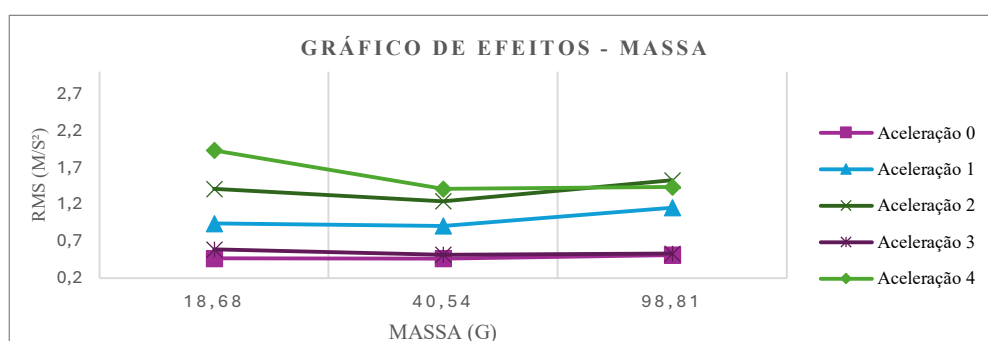


Figura 6 – Efeitos da Massa. Fonte: Próprio Autor

Já o comprimento da régua, figura 6, apresentou efeito menos pronunciado na maioria dos acelerômetros, exceto no TMD, onde o aumento do comprimento provocou crescimento da aceleração RMS, isso sugere que a redução de rigidez associada a maiores comprimentos torna o TMD mais suscetível a oscilações amplificadas, o que pode comprometer sua eficiência.

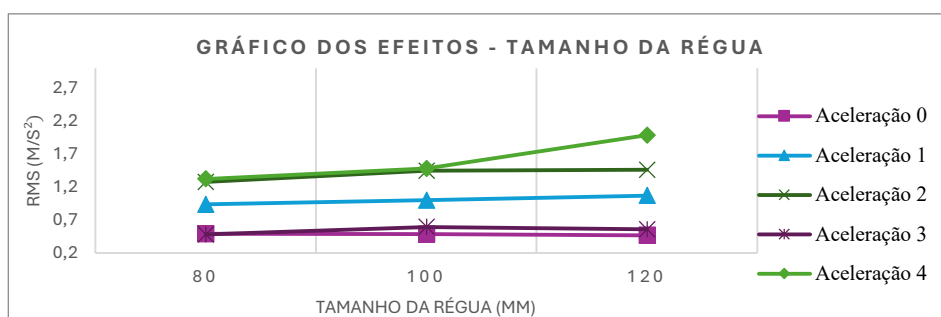


Figura 7 – Efeitos do tamanho da régua. Fonte: Próprio Autor

De modo geral, os resultados indicam que a eficiência do TMD está fortemente associada ao ajuste de massa e rigidez frente à condição de excitação imposta pelo vento, sendo a velocidade do escoamento o fator dominante na dinâmica do sistema.

Por fim, nota-se que aumentos de velocidade aumentam significativamente a resposta vibracional, portanto, velocidades mais altas (10,0 m/s) são condições piores para operação, gerando maiores vibrações. A massa intermediária (40,54 g) leva a uma redução global das vibrações em comparação com massas menor ou maior, assim, é a melhor condição de operação. Já para o comprimento da Régua, tamanhos menores (80 mm) tendem a resultar em menores vibrações, principalmente no TMD, desta forma aumentar o comprimento eleva a resposta RMS, indicando pior eficiência de controle. Uma combinação ideal baseada nos gráficos de efeitos é com velocidade do escoamento mais baixa (5,0 m/s), massa do TMD intermediária (40,54 g) e régua de menor comprimento (80mm), e a combinação menos favorável é com a velocidade do vento mais alta (10,0 m/s), massa menor (18,68 g) e régua mais longa (120 mm), isso sugere que a sintonia ideal ocorre quando o TMD tem massa e rigidez adequadas à frequência dominante do sistema, e que operar em condições de menor excitação aerodinâmica melhora o desempenho global do controle vibracional.

4 CONCLUSÕES

Este estudo experimental analisou o comportamento dinâmico de uma viga com massa concentrada, equipada com um sistema de controle passivo do tipo (TMD), submetida ao escoamento em túnel de vento. Por meio de um planejamento fatorial completo 3^3 , foram investigados os efeitos da velocidade do vento, da massa do TMD e do comprimento da régua sobre a resposta vibracional, avaliada por meio da aceleração RMS em cinco pontos da estrutura. Os resultados demonstraram que a velocidade do vento foi o fator mais influente sobre a resposta vibracional, evidenciando a dominância da excitação aerodinâmica no comportamento do sistema. Em relação a massa do TMD apresentou-se com uma influência significativa, especialmente nas regiões intermediárias da viga e no próprio absorvedor, sendo que a massa intermediária (40,54 g) se destacou por reduzir a vibração em vários pontos, sugerindo uma condição próxima da sintonia ideal. O comprimento da régua, por sua vez, teve efeito mais restrito, influenciando principalmente o próprio TMD, onde comprimentos maiores resultaram em maiores amplitudes, possivelmente devido à redução da rigidez do sistema secundário.

A aplicação da ANOVA permitiu identificar interações relevantes entre os fatores, sobretudo envolvendo a velocidade do vento, ressaltando a natureza multifatorial e não linear do

sistema vibratório analisado. A transformação de Box-Cox foi essencial para a validade estatística da análise, melhorando a normalidade e a homogeneidade dos resíduos.

Conclui-se que a eficiência do TMD está fortemente ligada ao ajuste fino de seus parâmetros físicos em relação às condições dinâmicas impostas, a sintonia apropriada entre massa, rigidez e a frequência de excitação é determinante para maximizar a transferência de energia e atenuar a vibração da estrutura.

Além disso, o uso de planejamento experimental mostrou-se uma ferramenta poderosa para compreender o comportamento de sistemas dinâmicos complexos, contribuindo de forma significativa para o desenvolvimento e otimização de dispositivos de controle passivo.

REFERÊNCIAS

- DEN HARTOG, J. P. *Mechanical Vibrations*. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 1956.
- FRAHM, H. *Device for damping vibrations of bodies*. U.S. Patent No. 989958, 1911.
- MEIROVITCH, Leonard. *Fundamentals of Vibrations*. New York: McGraw-Hill, 2001.
- MONTGOMERY, Douglas C. *Design and Analysis of Experiments*. 8. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2012.
- NATIONAL INSTRUMENTS. *LabVIEW Community Edition Documentation*. Austin, TX: National Instruments, 2023. Disponível em: <https://www.ni.com/documentation/en/labview/latest/>. Acesso em: 21 jun. 2025.
- NATIONAL INSTRUMENTS. *NI 9234 Datasheet*. Austin, TX: National Instruments, 2023. Disponível em: https://www.ni.com/pdf/manuals/374186a_02.pdf. Acesso em: 21 jun. 2025.
- WARBURTON, G. B. Optimum absorber parameters for various combinations of response and excitation parameters. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, v. 10, n. 3, p. 381–401, 1982.

APLICAÇÃO DA MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO (MADA) COM INCONEL 625 EM AMBIENTES CORROSIVOS POR CLORO: UMA REVISÃO

¹ Maria Helena R. Moreno, ¹ Demostenes Ferreira Filho

¹ Universidade Federal de Goiás – UFG

Alameda Ingá - Chácaras Califórnia, Goiânia – Goiás, 74045-155, Brazil

moreno2@discente.ufg.br, demostenesferreira@ufg.br

DOI: 10.5281/zenodo.19041614

Resumo. A corrosão em tubulações utilizadas no transporte de cloro em sistemas de saneamento básico é um problema recorrente, que reduz a vida útil dos componentes, causando falhas e elevando os custos de manutenção. Por tanto, torna-se necessário investigar materiais e processos de fabricação que ofereçam maior resistência em ambientes agressivos, com viabilidade econômica e rapidez na produção. A Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA), surge como uma alternativa promissora por permitir elevada taxa de deposição, menor desperdício de material e viabilidade econômica para a produção de peças de grande porte. Entre as ligas aplicadas em ambientes corrosivos, destaca-se o Inconel 625, uma superliga de níquel com elevada resistência à oxidação e corrosão por cloretos, amplamente utilizada em setores aeroespacial, petroquímico e nuclear. A aplicação desse material pela técnica MADA, apresenta potencial para a fabricação de flanges empregados em sistemas de transporte de cloro, onde atualmente predominam materiais como o aço carbono ASTM A106 Grau B, suscetíveis a rápida degradação. O objetivo desta pesquisa é revisar e discutir criticamente os avanços na aplicação da Manufatura MADA com ligas resistentes à corrosão, especialmente o Inconel 625, para componentes expostos a ambientes agressivos.

Palavras-chave: Chlorine; WAAM; Basic sanitation; Inconel 625; Corrosion.

1 INTRODUÇÃO

O saneamento básico desempenha um papel fundamental na saúde pública, sendo a desinfecção da água com cloro uma das etapas mais relevantes no processo de tratamento de água. Contudo, o transporte desse agente químico em tubulações metálicas está associado a elevados índices de corrosão, o que reduz a vida útil dos componentes, gera custos operacionais elevados e compromete a segurança do sistema. Estima-se que as perdas anuais relacionadas à corrosão representem entre 3% e 4% do PIB mundial, correspondendo a cerca de US\$ 2,5 trilhões (NACE INTERNATIONAL, 2016).

Os flanges metálicos utilizados no sistema de transporte de cloro atualmente são fabricadas em aço carbono ASTM A106 Grau B. Este metal apresenta rápida degradação quando expostos a ambientes clorados agressivos, exigindo substituições frequentes e impactando a confiabilidade operacional (WAN et al., 2023; YINGSAMPHANCHAROEN et al., 2016). Buscando reduzir o *lead time* de aquisição da peça e o custo de fabricação Lauriano (2024) buscou como solução produzir o flange através da manufatura aditiva, demonstrando a viabilidade da aplicação da Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA) na fabricação de tubos flangeados em aço AWS A5.18 ER70s6 para transporte de cloro, apresentando desempenho mecânico e resistência à corrosão superiores aos componentes convencionais (LAURIANO et al 2024).

A MADA, trata-se de uma técnica de deposição de cordões de solda multicamadas baseadas em modelos tridimensionais, destaca-se pela elevada taxa de deposição, menor desperdício de material e viabilidade na produção de peças de grandes dimensões, além de possibilitar o trabalho com diversos tipos de materiais metálicos. O Mada permite produzir componentes metálicos em geometria *near-net-shape*, reduzindo significativamente a necessidade de remoção de material por usinagem e melhorando a eficiência do uso de matéria-prima (MANSOR, 2024).

Entretanto, apesar dos bons resultados com o ER70S-6, persistem desafios em ambientes extremamente agressivos com elevada concentração de cloretos. Nesse cenário, o Inconel 625 se destaca como alternativa promissora, essa superliga de níquel possui alta resistência à corrosão por cloretos e excelente estabilidade mecânica e térmica (PAUL et al., 2007). Sua aplicação por MADA ainda demanda investigações mais profundas, tanto para otimização dos parâmetros de deposição quanto para avaliação de desempenho em condições severas.

Assim, este estudo se propõe a investigar e analisar criticamente os avanços relacionados à aplicação da MADA utilizando a liga Inconel 625. Além da revisão conceitual, este estudo

incorpora uma análise bibliométrica sobre o tema, realizada com base em publicações indexadas na base Scopus. A busca considerou os termos *Wire Arc Additive Manufacturing*, *Inconel 625*, *corrosion*, *chlorine* e *basic sanitation*, de modo a mapear a evolução das pesquisas e identificar os principais autores, periódicos e tendências científicas associadas. Essa análise permite compreender a relevância e a atualidade do tema, evidenciando o crescimento do interesse pela aplicação da MADA em ligas resistentes à corrosão.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A análise bibliométrica baseada em publicações da base Scopus (2010–2025) identificou 48.562 artigos relacionados à WAAM e Inconel 625. Observa-se crescimento contínuo das publicações a partir de 2018, com destaque para países como China (15.156) e Estados Unidos (8.560) seguidos por outras nações com atuação emergente, incluindo o Brasil (1.744) em 13°. Dentre os 1.000 artigos mais relevantes, as palavras chaves mais utilizadas estão em destaque na Figura 1. Indicando o foco em otimização de processos MADA e microestrutura do material.



Figura 1 – Nuvem de palavras mais utilizadas Fonte: Autor (2025)

3 DESENVOLVIMENTO

Nesta seção, busca-se aprofundar a discussão iniciada na introdução, organizando o conhecimento atual sobre a MADA e o uso do Inconel 625, com base em estudos recentes e reconhecidos na literatura.

3.1 Saneamento básico

A desinfecção e oxidação por cloro são essenciais nas estações de tratamento de água, mas falhas nesse sistema, especialmente sem estruturas redundantes, podem paralisar a produção. Um problema crítico é a corrosão dos tubos de transporte do cloro, cuja substituição exige instalações

robustas ou processos administrativos demorados para aquisição de novos componentes (LAURIANO et al 2024).

Nos sistemas de distribuição, materiais comuns incluem ferro dúctil, PVC, cobre e chumbo, mas o contato com o cloro acelera a corrosão de metais e a degradação de elastômeros e termoplásticos. Cada material apresenta diferentes mecanismos de deterioração: chumbo sofre corrosão uniforme liberando íons tóxicos; cobre, corrosão uniforme, pites, microbiológica, fadiga e erosão; latão, dezincificação, erosão e corrosão sob tensão. Esses processos podem causar vazamentos, rompimentos e obstruções, além de riscos à saúde por aumento de metais na água (KOCH et al. 2001). A Figura 2 mostra tubulações de transporte de cloro em uma empresa de saneamento de Goiânia, Goiás, a maior do estado, responsável pelo abastecimento de água e coleta de esgoto em 225 municípios.

A Figura 2-d evidencia um processo avançado de corrosão que compromete não apenas o tubo, mas também estruturas metálicas adjacentes. O sistema mostrado conecta uma carreta-tanque de 19.000 kg ao evaporador de cloro Siemens, modelo 50-200, responsável pela conversão do cloro líquido em gasoso.

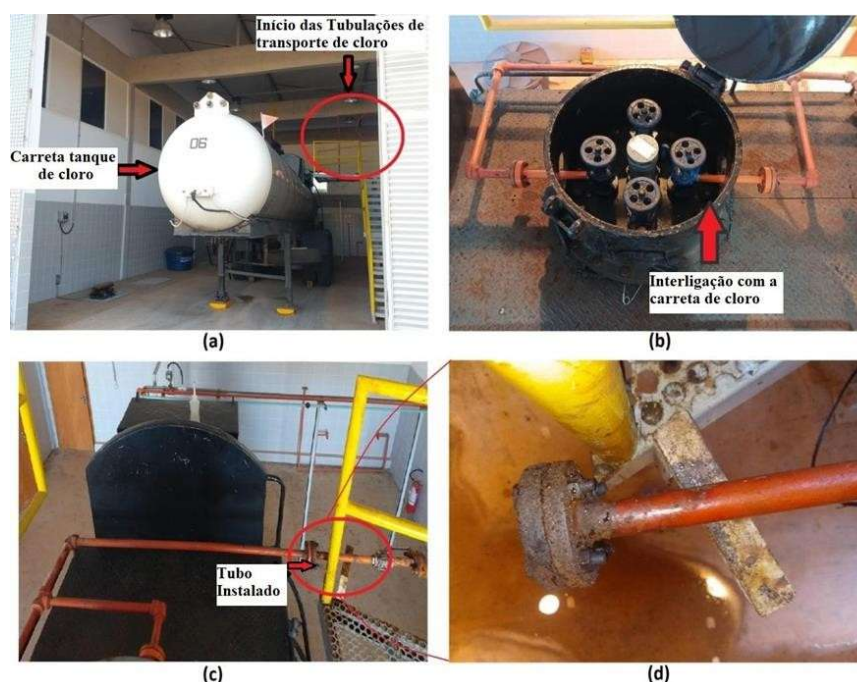


Figura 2 – Edifício de cloro: (a) Carreta tanque de cloro; (b) Interligação da carreta com o sistema de dosagem; (c) Tubo instalado; (d) Tubo sem conexão, com flange cego. Fonte: Silva (2024).

Dentro desse sistema, o flange desempenha papel fundamental ao interligar as tubulações ao módulo de dosagem de cloro. Contudo, a contínua exposição a ambientes altamente clorados

acelera sua degradação, especialmente em flanges de aço carbono convencionais, cuja substituição é frequentemente necessária em poucos meses. Esse desgaste recorrente aumenta os custos operacionais e eleva os riscos à segurança e à qualidade da água. Por isso, o projeto mecânico desses componentes deve atender a requisitos rigorosos, como resistência à tração superior a 400 MPa, rugosidade superficial classificada como N9 segundo a ISO 1302 ($R_a < 3,2 \mu\text{m}$ após fabricação) e elevada resistência à corrosão (LAURIANO et al., 2024).

O material mais utilizado para fabricação dos tubos é o aço carbono ASTM A106 Grau B, associado a flanges classe 300, amplamente aplicado em sistemas de condução de fluidos químicos. Apesar de suas boas propriedades mecânicas, resistência térmica e baixo custo, a suscetibilidade à corrosão permanece uma preocupação relevante (WAN et al., 2023; YINGSAMPHANCHAROEN et al., 2016). A NBR 12216 estabelece que tubulações, conexões e válvulas em contato com produtos químicos devem ser fabricadas em materiais resistentes, sem liberação de substâncias tóxicas (ABNT, 1995). Já a NBR 5590 define que os tubos ASTM A106 Grau B, além de serem apropriados para condução sob pressão, devem apresentar resistência à tração mínima de 415 MPa e limite de escoamento superior a 240 MPa, sendo adequados também para linhas de vapor, água, gás e ar comprimido (BRASILEIRA, 2015).

Segundo a ASM (2003), a taxa de corrosão do aço carbono em contato com cloro úmido pode alcançar até 40 mm/ano em baixas temperaturas. Em soluções com pH inferior a 10, a ausência de formação de filme passivo protetor favorece a corrosão uniforme induzida por íons cloreto. Além disso, estudos recentes apontam que a presença de cloro associada à atividade de bactérias redutoras de ferro intensifica a corrosão nos estágios iniciais de exposição, acelerando a degradação estrutural de tubulações metálicas (XU et al., 2022).

Diante desse cenário, a adoção de ligas avançadas, como o Inconel 625, e de técnicas inovadoras de fabricação, como a MADA, surge como alternativa para garantir maior durabilidade, confiabilidade e segurança nos sistemas de tratamento de água.

3.2 MADA

A manufatura aditiva (AM), também conhecida como impressão 3D, consiste na produção de geometrias complexas por meio da deposição sucessiva de material em camadas, caracterizando-se por menor desperdício quando comparada aos métodos convencionais de fabricação (ZHOU et al., 2024). Inicialmente restrita à prototipagem rápida, a AM expandiu-se para setores estratégicos, como os segmentos aeroespacial, automotivo, biomédico e moda,

Aplicação da Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (Mada) Com Inconel 625 em Ambientes Corrosivos por Cloro
impulsionada pela possibilidade de empregar diferentes classes de materiais, incluindo ligas metálicas (LI et al., 2022).

Entre as tecnologias de AM metálica, destacam-se o Powder Bed Fusion (PBF) e o Directed Energy Deposition (DED). O PBF oferece alta precisão e acabamento superficial, mas envolve custos elevados e riscos com pó metálico. A DED permite altas taxas de deposição e fabricação de peças grandes, especialmente quando utiliza arame metálico, reduzindo custos e riscos ocupacionais (CUNNINGHAM et al., 2018a; LADANI et al., 2021).

A MADA é uma variação do DED que utiliza arco elétrico para fundir arame camada a camada, oferecendo alta eficiência energética, taxas de deposição elevadas e baixo desperdício. Seu desempenho depende do controle de parâmetros como corrente, tensão, velocidade de alimentação e temperatura intercamadas (SHAH et al., 2023). Os processos associados incluem GTAW, PAW e GMAW (CUNNINGHAM et al., 2018b).

No GTAW, o arco entre um eletrodo de tungstênio e o substrato funde o arame lateralmente alimentado (Figura 3a). O PAW é semelhante, mas utiliza bico resfriado a água e plasma para maior eficiência, com custo inicial elevado (Figura 3b). O GMAW, mais utilizado, combina arame consumível e material de adição, fundido diretamente pelo arco, oferecendo alta taxa de deposição e bom aproveitamento de material (Figura 3c) (SHAH et al., 2023).

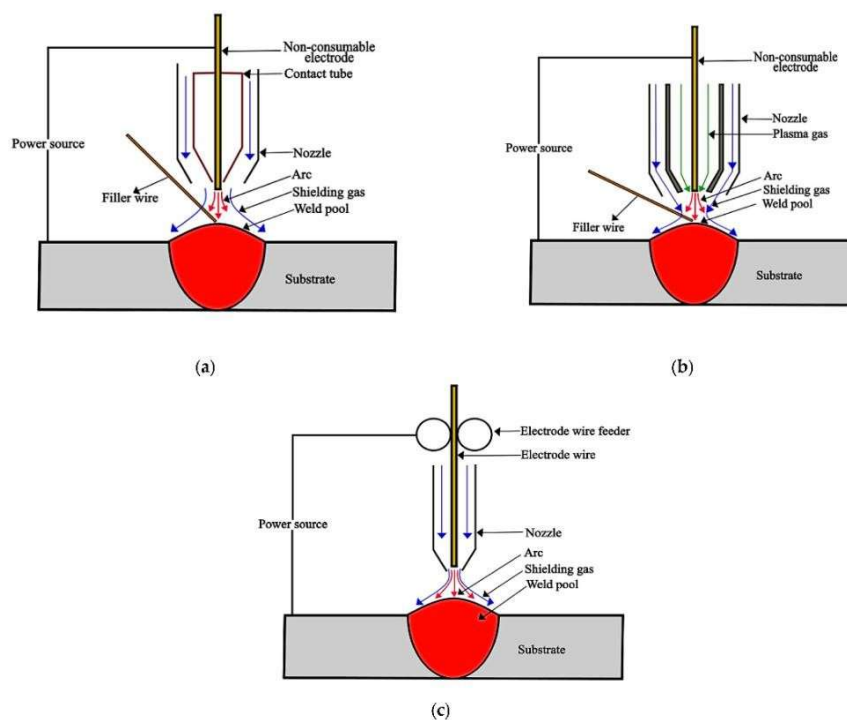


Figura 3 – Tipos de processos MADA. (a) GTAW; (b) PAW; (c) GMAW. Fonte: (SHAH e colab., 2023)

Diante dessas características, a MADA apresenta um campo em expansão, combinando simplicidade operacional e elevado desempenho estrutural. Apesar dos avanços, seu uso ainda requer estudos sobre controle de parâmetros, comportamento metalúrgico e desempenho em ambientes agressivos, aspectos essenciais para consolidar a tecnologia industrialmente e explorar ligas como o Inconel 625.

3.3 Inconel 625

O Inconel 625 é uma liga níquel-base, não magnética, reconhecida por alta resistência à corrosão, oxidação e desempenho mecânico superior em temperaturas de até 1093 °C (2000 °F). Seu reforço resulta da combinação de nióbio e molibdênio com uma matriz de níquel-cromo: o níquel e o cromo conferem resistência em ambientes oxidantes, o molibdênio previne corrosão por pites e frestas, e o nióbio garante estabilidade durante a soldagem (PAUL et al., 2007).

Essas características tornam o Inconel 625 amplamente utilizado em setores estratégicos, como aeronáutico, petroquímico e nuclear (MOHAMMADI, 2014; SHANKAR et al., 2001). Seu uso em manufatura aditiva tem sido estudado devido à combinação de resistência à corrosão, soldabilidade e estabilidade térmica e química. No entanto, desafios como alto aporte térmico e segregação de elementos podem afetar a microestrutura, gerando grãos maiores, maior espaçamento dendrítico e risco de fragilização (HUEBNER et al., 2020; WANG et al., 2021; ROSLI et al., 2021). Para reduzir os efeitos do calor excessivo, o processo CMT (Cold Metal Transfer), variante do GMAW, tem sido amplamente utilizado. Ele sincroniza a alimentação do arame com o arco elétrico, permitindo retração durante o curto-circuito, o que resulta em transferência metálica estável, praticamente sem respingos e com menor aporte térmico (SHANKAR et al., 2023). Ainda assim, desafios permanecem, como variabilidade das propriedades mecânicas e microestruturais, especialmente em uniões dissimilares, e tensões residuais geradas pela deposição em múltiplas camadas, que podem comprometer a integridade do componente (AIN et al., 2025).

Pesquisas recentes destacam a importância do controle térmico em MADA. Zhang et al. (2022) mostraram que menores aportes de calor no WAAM-CMT aplicado ao Inconel 625 resultam em melhor acabamento superficial, microestrutura homogênea e redução da anisotropia mecânica. Souza et al. (2020) observaram que revestimentos aplicados por GMAW apresentaram estruturas dendríticas mais refinadas nos menores níveis de energia. Guo et al. (2021) relataram propriedades mecânicas expressivas em amostras de Inconel 625 via MADA: limite de escoamento de 450 MPa, resistência à tração de 736 MPa, alongamento de 38%, redução de área de 52% e energia de

impacto de 152 J, com baixa taxa de corrosão intergranular (0,609 mm/ano). Apesar da alta resistência à corrosão do Inconel 625, ainda há escassez de estudos sobre seu desempenho em peças produzidas por manufatura aditiva, reforçando a necessidade de pesquisas voltadas à otimização de parâmetros de processo e expansão do uso industrial da MADA (GUO et al., 2021).

3.4 Parâmetros de processo e controle da qualidade

O sucesso da fabricação de peças em Inconel 625 por MADA depende de um controle rigoroso de parâmetros operacionais. A corrente e a tensão determinam a energia entregue ao arame, enquanto a velocidade de alimentação e a distância entre o bico e o substrato influenciam a uniformidade da deposição e a porosidade da peça (LADANI; SADEGHILARIDJANI, 2021).

O uso de gases de proteção inertes, como argônio ou uma mistura de argônio e hélio, é essencial para evitar oxidação e contaminação durante o processo. Estudos indicam que a variação na composição e no fluxo do gás afeta a estabilidade do arco e a penetração da solda, influenciando propriedades mecânicas e microestruturais (LI et al., 2022). Além do controle dos parâmetros, a caracterização pós-processo é fundamental para assegurar a qualidade. Técnicas como análise de microscopia óptica e eletrônica, difração de raios X e ensaios mecânicos são utilizadas para avaliar a microestrutura, densidade, dureza e resistência à corrosão, permitindo otimizar o processo e garantir a confiabilidade do componente (SOUZA et al., 2022).

3.5 Corrosão

A corrosão e a degradação resultante da interação com o ambiente, degradação de metais e não metais, comprometendo sua durabilidade. Embora existam materiais metálicos altamente resistentes à corrosão, seu alto custo limita a aplicação em larga escala. Por isso, muitas vezes utilizam-se materiais suscetíveis à corrosão uniforme, mas de progressão lenta. No entanto, falhas graves frequentemente decorrem de corrosão localizada, que pode causar ruptura prematura. Os impactos industriais da corrosão são amplos, incluindo paradas de planta, desperdício de materiais, contaminação de produtos, perda de eficiência e aumento de custos com manutenção. Controlá-la exige compreensão dos mecanismos envolvidos, uso de materiais adequados, bom projeto e técnicas de proteção eficientes (JIMÉNEZ-COME e colab., 2023; ROBERGE, 2000).

O processo de corrosão pode envolver múltiplas reações complexas, influenciadas por diversos fatores, como as condições ambientais (pH, temperatura), as propriedades do material (composição química, estado superficial) e as condições operacionais (tensões aplicadas, exposição a agentes químicos) (ARACHCHIGE e colab., 2025).

4 METODOLOGIA

Este trabalho foi desenvolvido como uma revisão bibliográfica de caráter qualitativo e exploratório, com o objetivo de analisar criticamente os avanços na aplicação da MADA utilizando o Inconel 625 aplicado a ambientes corrosivos. A busca de artigos foi realizada em bases científicas reconhecidas, incluindo Periódicos CAPES, ScienceDirect, Scopus e Web of Science, abrangendo publicações entre os anos de 2000 e 2025. As palavras-chave utilizadas foram: *Chlorine*, *Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM)*, *Basic sanitation*, Inconel 625 e *Corrosion*. Foram priorizados estudos que abordassem:

- Aplicações industriais da MADA;
- Caracterização microestrutural e mecânica do Inconel 625 produzido por MADA;
- Ensaios de corrosão em ligas de níquel aplicadas à manufatura aditiva;
- Análises comparativas com materiais tradicionalmente utilizados, como o aço carbono.

Após a coleta, os trabalhos foram organizados e analisados criticamente, buscando identificar convergências, divergências e lacunas de pesquisa relacionadas à aplicação da MADA com Inconel 625.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir da análise crítica da literatura, é possível destacar os principais benefícios e desafios associados à aplicação da MADA com Inconel 625 em ambientes corrosivos.

Principais benefícios identificados na literatura:

- Elevada resistência à corrosão: Adequada para aplicações em ambientes agressivos;
- Redução de desperdício de material: Em consequência reduz custo com material;
- Flexibilidade na fabricação: Fabricação de componentes complexas e de grande porte; Desafios e lacunas observadas:
- Otimização de parâmetros de deposição para geometrias complexas;
- Avaliação do desempenho à corrosão em condições reais de operação;
- Controle de tensões residuais e anisotropia mecânica;
- Padronização da qualidade em múltiplas camadas depositadas.

Esses desafios evidenciam a necessidade de pesquisas futuras que consolidem a MADA com Inconel 625 como uma solução industrial confiável, permitindo maximizar seus benefícios em aplicações críticas.

6 CONCLUSÕES

Conclui-se que a MADA aplicada ao Inconel 625 é uma alternativa promissora para a fabricação de componentes expostos à corrosão química, combinando elevada resistência, estabilidade mecânica e potencial de redução de custos. Embora desafios técnicos, como controle de parâmetros e variabilidade microestrutural, ainda persistam, processos como o CMT têm avançado na superação dessas limitações, aproximando a tecnologia de uma consolidação industrial. Assim, a MADA com Inconel 625 desponta como estratégia relevante para setores como saneamento, químico e petroquímico, sendo essencial a continuidade de pesquisas voltadas a otimização de parâmetros e em estudos de corrosão em condições reais de operação, de modo a viabilizar sua aplicação em larga escala

REFERÊNCIAS

- AIN, Mir Qurrat Ul e colab. Comprehensive analysis of experimental studies in cold metal transfer welding. Discover Applied Sciences. [S.l.]: Springer Nature. , 1 Jun 2025
- ARACHCHIGE, Lakshitha Jasin; LI, Chunqing; WANG, Feng. Recent advances in understanding iron/steel corrosion: Mechanistic insights from molecular simulations. Current Opinion in Solid State and Materials Science. [S.l.]: Elsevier Ltd. , 1 Mar 2025
- BRASILEIRA, Norma. ABNT NBR NTBNET-Licença de uso exclusivo para o Sistema Petrobras. 2015.
- CUNNINGHAM, C. R. e colab. Invited review article: Strategies and processes for high quality wire arc additive manufacturing. Additive Manufacturing. [S.l.]: Elsevier B.V. , 1 Ago 2018^a
- GERHARDUS H. KOCH; MICHEL PETER HEIN BRONGERS. Cost of Corrosion in the United States. Jan 2001.
- GUO, Chun e colab. Microstructural and intergranular corrosion properties of Inconel 625 superalloys fabricated using wire arc additive manufacturing. Materials Research Express, v. 8, n. 3, 1 Mar 2021.
- HUEBNER, Jan e colab. Heating conditions influence on solidification of inconel 625-WC system for additive manufacturing. Materials, v. 13, n. 13, 1 Jul 2020.
- JIMÉNEZ-COME, María Jesús e colab. Corrosion Behaviour Modelling Using Artificial Neural Networks: A Case Study in Biogas Environment. Metals, v. 13, n. 11, 1 Nov 2023.
- LADANI, Leila; SADEGHILARIDJANI, Maryam. Review of powder bed fusion additive manufacturing for metals. Metals. [S.l.]: MDPI. , 1 Set 2021
- LAURIANO, Lucas; Avaliação da Aplicabilidade da Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA) para Produção de Tubo de Aço Aplicado em Transporte de Cloro. . [S.l.: s.n.], 2024.
- LI, Yan; SU, Chen; ZHU, Jianjun. Comprehensive review of wire arc additive manufacturing: Hardware system, physical process, monitoring, property characterization, application and future prospects. Results in Engineering. [S.l.]: Elsevier B.V. , 1 Mar 2022
- MANSOR, M. S. M.; e colab. Integrated approach to Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) optimization. Journal of Materials Research and Technology, v. 29, p. 13543–13557, 2024.
- MOHAMMADI ZAHRAANI, E.; ALFANTAZI, A. M. High temperature corrosion and electrochemical behavior of

INCONEL 625 weld overlay in PbSO₄- Pb₃O₄-PbCl₂-CdO-ZnO molten salt medium. Corrosion Science, v. 85, p. 60–76, 2014.

NACE INTERNATIONAL; e colab. International Measures of Prevention, Application and Economics of Corrosion Technology (IMPACT). Houston: NACE International, 2016.

PAUL, C. P. e colab. Investigating laser rapid manufacturing for Inconel-625 components. Optics and Laser Technology, v. 39, n. 4, p. 800–805, Jun 2007.

ROBERGE, Pierre R.. Handbook of corrosion engineering. [S.l.]: McGraw-Hill, 2000.

ROSLI, Nor Ana e colab. Review on effect of heat input for wire arc additive manufacturing process. Journal of Materials Research and Technology. [S.l.]: Elsevier Editora Ltda. , 2021

SHAH, Abid e colab. A Review of the Recent Developments and Challenges in Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) Process. Journal of Manufacturing and Materials Processing. [S.l.]: MDPI. , 1 Jun 2023

SHANKAR, Vani e colab. Letter to the Editors Microstructure and mechanical properties of Inconel 625 superalloy. . [S.l: s.n.], 2001. Disponível em: .

WAN, Huihai e colab. Effect of sulfate reducing bacteria on the galvanic corrosion behavior of X52 carbon steel and 2205 stainless steel bimetallic couple. Corrosion Science, v. 212, 1 Mar 2023.

WANG, Yangfan e colab. Effect of magnetic Field on the microstructure and mechanical properties of inconel 625 superalloy fabricated by wire arc additive manufacturing. Journal of Manufacturing Processes, v. 64, p. 10– 19, 1 Abr 2021.

XU, Ping e colab. Effect of chloride ions on the corrosion behavior of carbon steel in an iron bacteria system. RSC Advances, v. 12, n. 24, p. 15158–15166, 18 Mai 2022.

YINGSAMPHANCHAROEN, Trinet; SRISUWAN, Nakarin; RODCHANAROWAN, Aphichart. The electrochemical investigation of the corrosion rates of welded pipe ASTM A106 grade B. Metals, v. 6, n. 9, 1 Set 2016.’

ZHANG, Chengxun e colab. On the effect of heat input and interpass temperature on the performance of inconel 625 alloy deposited using wire arc additive manufacturing–cold metal transfer process. Metals, v. 12,

n. 1, 1 Jan 2022.

ZHOU, Longfei e colab. Additive Manufacturing: A Comprehensive Review. Sensors. [S.l.]: Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). , 1 Mai 2024



ARQUITETURA NETWORK-IN-NETWORK OTIMIZADA COM INCEPTION PARA CLASSIFICAÇÃO MULTI-CLASSE DE IMAGENS ESPORTIVAS

¹ G. A. Costa, ¹ J. P. S. Fonseca, ² F. H. T. Vieira, ² A. A. Cardoso

¹ PPGMEC, Universidade Federal de Goiás

UFG - Campus II, Prédio B5, Campus Samambaia – UFG, 74690900 - Goiânia – Goiás, Brasil
alvescosta@discente.ufg.br, jpsfonseca@ufg.br

² PPGEEC, Universidade Federal de Goiás, UFG – Campus I, Avenida Universitária - de 1/2
a 2099/2100, Setor Leste Universitário, 74605010 - Goiânia – Goiás, Brasil

alsnac@ufg.br, flavio_vieira@ufg.br

DOI: 10.5281/zenodo.19041210

Resumo. Este trabalho apresenta a utilização do conceito de *inception* para otimização da arquitetura de redes neurais convolucionais baseadas no conceito *Network-In-Network* (NiN) para classificação de imagens esportivas. O *dataset* utilizado contém 14.493 imagens de resolução 224×224 pixels em 3 canais RGB, contendo 100 esportes diferentes, sendo dividido em conjuntos de treinamento, validação e teste. O Modelo 1 implementa uma arquitetura NiN clássica composta por três etapas sequenciais, onde a primeira etapa faz uma extração de features de baixo nível, a segunda etapa contém 5 blocos de NiN e a última etapa consiste em uma rede *Multi-Layer Perceptron* (MLP) para classificação. Esta arquitetura NiN possui aproximadamente 43,28 milhões de parâmetros e atingiu acurácia máxima de 81,192% após 1000 épocas de treinamento. O Modelo 2 incorpora 3 blocos de *Inception* intercalados com 2 blocos de NiN na arquitetura e possui 9,89 milhões de parâmetros totais e atingiu acurácia máxima de 90,16%. A perda mínima de treinamento foi de 0,0001 para o Modelo 1 e 0,0153 para o Modelo 2, enquanto as perdas de validação foram 1,1317 e 0,3844, respectivamente. A arquitetura com blocos *Inception* demonstrou ser 4,37 vezes menor em quantidade de parâmetros, evidenciando maior eficiência computacional e melhor relação entre acurácia e complexidade do modelo. Conclui-se que a aplicação do conceito de *Inception* em arquiteturas NiN proporciona resultados superiores com

significativa redução de parâmetros, tornando o modelo mais eficiente para problemas de classificação de imagens.

Palavras-chave: Visão computacional, Classificação de imagens, NiN, CNN, *Inception*

1 INTRODUÇÃO

A visão computacional, voltada a classificação de imagem e detecção de objetos, obteve um grande avanço com a evolução da Redes Neurais Convolucionais (CNNs) (LeCun, 2015). As arquiteturas de CNNs têm se tornando cada vez mais profundas e complexas na busca em melhorar a representação do conjunto de dados, aumentando a acurácia (Goodfellow, 2016).

Uma arquitetura que visa aprimorar a representatividade local dos mapas de características é o conceito *Network-In-Network* (NiN), proposto por Lin em 2013. A ideia central é introduzir uma rede neural profunda constituída por vários blocos simples de camadas convolucionais com kernel de tamanho 1x1 e na substituição de uma Multi-Layer Perceptron (MLP) para a classificação da imagem por uma técnica chamada *Global Average Pooling* (Lin, 2014).

A busca constante por modelos mais eficientes e com maior capacidade de generalização levou ao desenvolvimento do conceito de *Inception*, introduzido pela arquitetura (Szegedy, 2015). Ao tentar abordar o problema sobre o tamanho ideal do kernel dos filtros para extrair as melhores características de uma imagem, o *Inception* introduz a ideia de um bloco composto por redes com kernel de diferentes tamanho trabalhando em paralelo com suas saídas sendo concatenadas. Esse conceito permite que a rede extraia características de diferentes tamanhos na imagem simultaneamente, permitindo acesso a mais informações para classificação de imagem permitindo um ganho maior de acurácia (Szegedy, 2015).

O desafio moderno das redes profundas consiste em encontrar um equilíbrio entre profundidade e complexidade do modelo, que utiliza como métrica a quantidade de parâmetros da rede, com a capacidade preditiva e generalização das redes. Modelos com complexidade excessiva tendem a se adequar muito aos dados de teste perdendo a capacidade de generalização o que causa uma perda de acurácia em imagens do conjunto de teste e validação (Goodfellow, 2016).

Este trabalho foi desenvolvido como um estudo pratico referente à disciplina Redes Neurais Profundas, oferecida pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação durante o segundo semestre letivo de 2025. No contexto da engenharia mecânica, uma possível aplicação é no controle de qualidade do processo de fabricação, como na inspeção de juntas soldadas ou na verificação de componentes usinados, a partir de imagens com as quais é

possível classificar a qualidade da peça final. O objetivo deste trabalho é explorar a utilização do conceito de *Inception* como estratégia de otimização de uma arquitetura similar a *Network-In-Network* para classificação de um *dataset* que contém imagens de diferentes práticas esportivas. A escolha deste *dataset* se deu pela disponibilidade dos dados para o estudante em questão, mas não se limita apenas a essa aplicação. A hipótese é que a utilização do bloco de *Inception* possa permitir atingir uma acurácia similar ou aprimorada enquanto é utilizada uma rede neural menor, comparando com a solução sem a inserção do bloco *Inception* caracteriza-se por uma redução na sua quantidade de parâmetros, tornando-se assim um modelo mais eficiente na classificação de imagem.

2 METODOLOGIA

2.1 Base de Dados

Este trabalho utiliza um *dataset* de esportes que contém 14.492 imagens de resolução de 224x224 pixels e 3 canais RGB, onde o *dataset* possuem 100 esportes diferentes para classificação. O particionamento consiste em 1000 imagens para validação e 13.492 imagens para o treinamento.

2.2 Pré-processamento das imagens.

Com o objetivo de aumentar a generalização do modelo treinado, as imagens passaram por transformações, sendo elas:

- Aplicação de desfoque Gaussiano com Kernel 5x5 e sigma 0.1 e 0.2
- Rotação aplicada aleatoriamente entre 0 e 15°
- Reflexão horizontal com probabilidade de 50%
- Reflexão vertical com probabilidade de 50%
- Ajuste de brilho, contraste e saturação em 0.2

Além desses ajustes, foi aplicado normalização dos dados utilizando as estatísticas do ImageNet (Deng, 2009), essa técnica ajuda na convergência do modelo. Parâmetros utilizados:

- Média RGB: [0.485, 0.456, 0.406]
- Desvio padrão: [0.229, 0.224, 0.225]

O conjunto de teste e validação não recebeu as transformações de rotação e reflexão. A figura 1 representa um exemplo da transformação aplicada no conjunto de treinamento.

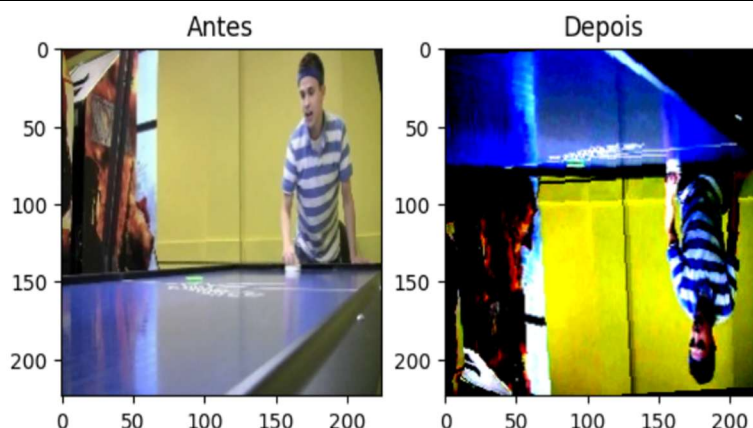


Figura 1. Exemplo de imagem da base de dados, antes e depois da transformação. Fonte: O autor

2.3 Arquitetura Proposta – Modelo 1

A arquitetura desenvolvida é uma variação da Network-In-Network (NiN), onde as principais adições é o *batch normalization*. A arquitetura conta com 3 etapas, a etapa inicial é idealizada na tentativa de extrair *features* de baixo nível e reduzir o tamanho da imagem inicialmente e conta com as seguintes etapas:

- Convolução 2D: 64 Canais de saída, Kernel 7x7, *stride 2* e *padding 3*.
- Batch Normalization.
- Função ReLU.
- Max Pooling: kernel 3x3, stride 2, padding 1

A Segunda etapa é composta por 5 blocos NiN sequenciais compostas pelas camadas:

- Convolução 3x3 com stride 1 e padding 2.
- Batch Normalization + ReLU.
- Convolução 1x1.
- Batch Normalization + ReLU.
- Convolução 1x1.
- Batch Normalization + ReLU.
- Max Pooling 3x3, stride 2, padding 1.

A terceira etapa é um MLP que consiste nas seguintes camadas:

- AdaptiveAvgPool2d e Flatten
- Dropout(0.5)
- Camada densa com 2048 neurônios de saída.

- BatchNorm, ReLU e Dropout(0.5)
- Camada densa com 1024 neurônios de saída.
- BatchNorm, ReLU e Dropout(0.4)
- Camada densa com 512 neurônios de saída.
- BatchNorm, ReLU e Dropout(0.3)
- Camada densa com 100 neurônios de saída.

Na saída é aplicada *Softmax*, é uma função que converte um vetor de valores numéricos em probabilidades que somam 1, a classe com maior valor irá gerar a maior probabilidade sendo esse o resultado para uma dada imagem de entrada. A Tabela 1 expressa um resumo da arquitetura e seus parâmetros.

Tabela 1. Resumo da arquitetura do modelo 1.

	Estágios	Canais	Resolução de saída	Parâmetros
Inicial	conv7×7 + BN + ReLU + <i>MaxPool</i>	64	224x224 - 56x56	9.600
NiN-1	Conv3×3 + 2×Conv1×1 + BN + ReLU + <i>MaxPool</i>	128	28x28	106.624
NiN-2	Conv3×3 + 2×Conv1×1 + BN + ReLU + <i>MaxPool</i>	256	14x14	427.264
NiN-3	Conv3×3 + 2×Conv1×1 + BN + ReLU + <i>Dropout</i> (0.3) + <i>MaxPool</i>	512	7x7	1.706.496
NiN-4	Conv3×3 + 2×Conv1×1 + BN + ReLU + <i>Dropout</i> (0.3) + <i>MaxPool</i>	1024	4x4	6.821.888
NiN-5	Conv3×3 + 2×Conv1×1 + BN + ReLU + <i>Dropout</i> (0.3) + <i>MaxPool</i>	2048	1x1	27.267.072
Classificador	AdaptiveAvgPool + Flatten + 4×FC + Dropout(0.5)	2048 - 100	-	6.650.600
Total	-	-	-	43.289.544

Legenda: BN – Batch Normalization, FC - Fully connected. Fonte: Próprio autor

2.4 Arquitetura Proposta – Modelo 2

O modelo 2 possui em sua essência a adição de blocos de *inception*, do qual consiste em uma rede que possui vários caminhos e depois são concatenados. A parte inicial continua a mesma do modelo 1. Os blocos de *Inception* são definidos da seguinte forma, de acordo com seus caminhos:

- Caminho 1: Conv 1x1
- Caminho 2: Conv 1x1 -> Conv 3x3
- Caminho 3: Conv 1x1 -> Conv 5x5
- Caminho 4: *MaxPool* 3x3 -> Conv 1x1

A etapa de classificação do modelo 2 possui a mesma arquitetura do modelo 1, exceto pelo tamanho da entrada, que é diferente, no modelo 1 a entrada é de 2048 enquanto no modelo 2 a entrada é de 640. A tabela 2 apresenta um resumo da arquitetura.

Tabela 2. Resumo da arquitetura do Modelo 2.

	Estágios	Canais	Resolução de saída	Parâmetros
Inicial	Conv 7x7 + BN + ReLU + <i>MaxPool</i>		224x224 -	14.400
		96	56x56	
Inception 1	Módulo Inception		56x56	169.152
		384		
NiN 1	Conv3x3 + 2xConv1x1 + BN + ReLU + <i>MaxPool</i>		28x28	623.616
		384		
Inception 2	Módulo Inception	480	28x28	468.672
NiN 2	Conv3x3 + 2xConv1x1 + BN + ReLU + <i>MaxPool</i>		14x14	2.738.688
	+ <i>Dropout</i> (0.3)	512		
Inception 3	Módulo Inception	640	14x14	862.512
Classificador	AdaptiveAvgPool + Flatten + 4xFC + <i>Dropout</i> (0.5)		-	3.949.108
		100		
Total	-	-	-	9.896.148

Legenda: BN – Batch Normalization, FC - Fully connected.

Fonte: Próprio autor.

A Tabela 3 apresenta uma comparação das duas arquiteturas baseada nos parâmetros e memória consumida.

Tabela 3. Comparação entre as arquiteturas avaliadas.

Métrica	NiN-Sports	Inception-Sports
Parâmetros Totais	43.3M	9.9M
Classes de saída	100	100
Memória (parâmetros)	165.14 MB	37.75 MB
Memória (total)	242.57 MB	263.73 MB
Blocos principais	5 NiN	3 Inception + 2 NiN

Fonte: O autor

2.5 Treinamento

▪ Configurações de Hiper parâmetros

Após diversos testes foram selecionadas as seguintes configurações que melhor se encaixaram com a arquitetura proposta:

- Função de perda: Cross-Entropy Loss
- Otimizador: AdamW (Loshchilov, 2017)
- Taxa de Aprendizado: $\text{lr} = 0.0005$
- Regularização L2: 0,0001
- Tamanho do Batch: treinamento = 64, validação e teste = 128.
- Número de épocas: 1000 para modelo 1 e 1500 para modelo 2.
- Scheduler: Cosine Annealing.

▪ Inicialização de Pesos.

Quando inicializados com os valores padrões da biblioteca Torch o modelo não apresentava melhoria após treinamento, basicamente o resultado sempre apontava para a mesma classe em todas as imagens de teste e validação. O problema foi solucionado ao utilizar as seguintes inicializações de pesos:

- Camadas Convolucionais: Inicialização Kaiming Normal (He, 2015).
- Camadas Lineares: Inicialização Xavier Uniforme (Glorot, 2010)
- *Batch Normalization*: Peso = 1 e Bias = 0.

▪ Infraestrutura de treinamento.

Para o treinamento foi utilizado computador pessoal com as seguintes configurações, pacotes e versões:

- Sistema Operacional: Utilizando *Windows Subsystem for Linux* (WSL) com Ubuntu 22.04 LTS.
- GPU: AMD Radeon RX 7800 XT 16GB VRAM.
- CPU: AMD Ryzen 5 5600
- ROCm: (Análogo ao CUDA para GPUs da AMD) Versão 7.01
- Framework: PyTorch 2.1.0

O script de treinamento foi escrito utilizando o Jupyter Notebook dentro do Visual Studio Code.

▪ Métricas de avaliação.

O desempenho do modelo foi medido pelas seguintes métricas:

- Acurácia de validação.
- Perda do conjunto de validação.
- Perda do conjunto de treinamento.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 2 representa a acurácia atingida pelos modelos 1 e 2, sendo que o modelo 1 após 1000 épocas de treinamento atingiu 81,11% no conjunto de validação sendo a máxima atingida de 81,192%, já o modelo 2 em 1000 épocas atingiu 87,72% e em 1500 épocas atingiu 87% com máxima de 90,16%. O modelo 2 atingiu a acurácia do modelo 1 somente com 150 épocas. Poderia ser considerado a utilização de um critério de parada do treinamento referente a estabilização do ganho de acurácia, no modelo 1 houve uma estabilização após 700 épocas de treinamento, enquanto o modelo 2 poderia se beneficiar de mais épocas de treinamento.

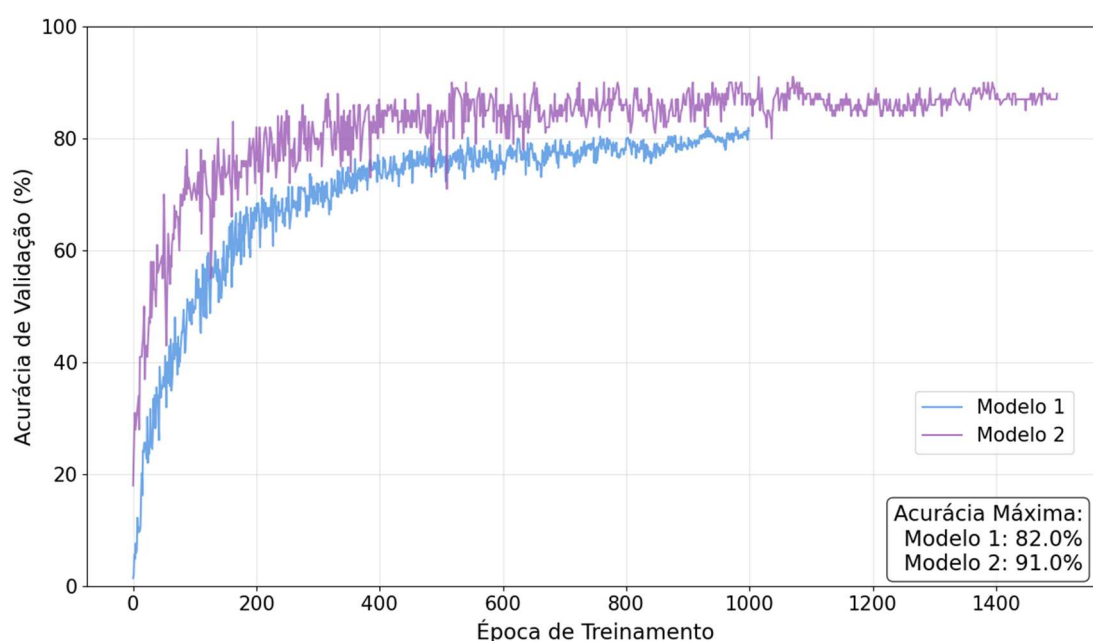


Figura 2. Evolução da acurácia dos modelos ao longo das épocas de treinamento. Fonte: Próprio autor

A Figura 3 representa a perda do treinamento, onde o modelo 1 atingiu valor mínimo de 0,0001 enquanto o modelo 2 atingiu valor mínimo de 0,0153. Percebe-se que o modelo 1 se adequou ao conjunto de treinamento de forma rápida e estável com perda próxima de zero o que pode indicar uma capacidade pior de generalização quando comparado ao modelo 2, que teve uma

variação da perda bem maior. Na Figura 4, observa-se uma perda mínima para modelo 1 de 1,1317 e 0,3844 para o modelo 2, esses resultados reforçam a observação anterior que o modelo 2 tem uma capacidade melhor de generalização o que gera um resultado mais promissor no conjunto de validação, por gerar uma perda menor.

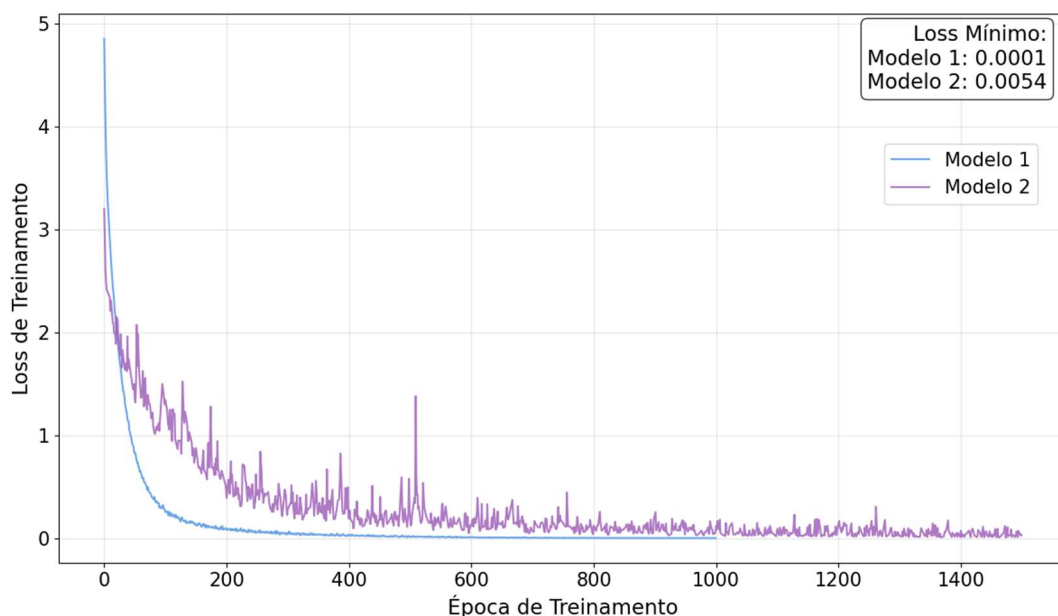


Figura 3. Gráfico de Perda do conjunto de treinamento dos modelos. Fonte: Próprio autor

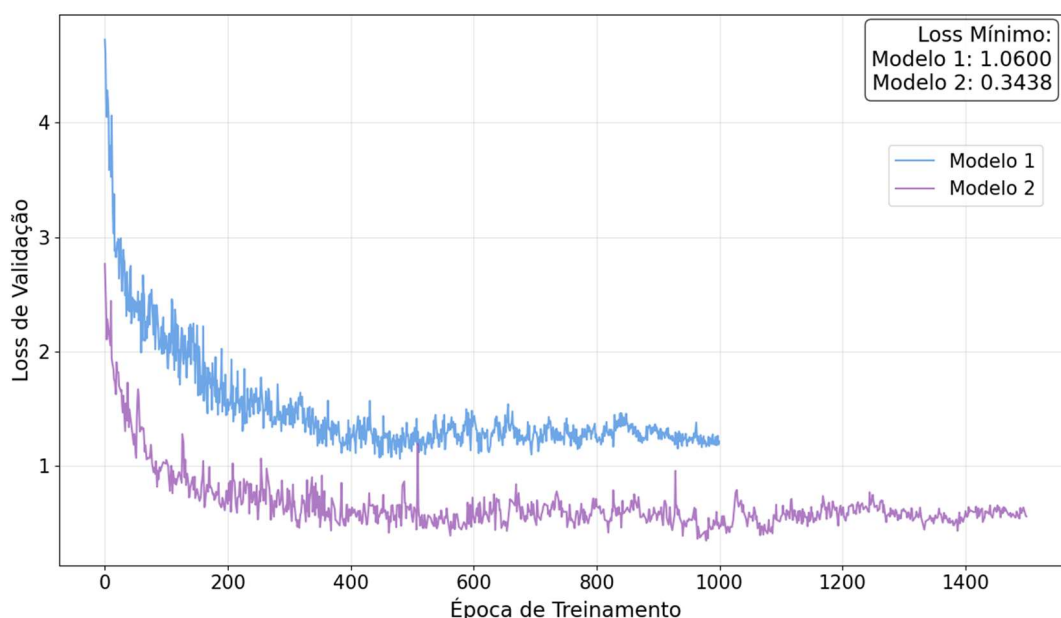


Figura 4. Gráfico de Perda do conjunto de Validação dos modelos. Fonte: Próprio autor

A instabilidade dos gráficos deve-se ao uso do *dropout*, no qual desativa uma porcentagem dos neurônios de uma dada camada, causando o ruído enquanto aumenta a capacidade de generalização do modelo.

Os resultados alcançados demonstraram que o modelo alcançou uma acurácia 9 pontos percentuais maior do que o modelo 1, além de uma capacidade de generalização maior. Além disso, é importante destacar que a arquitetura *inception* também atuou na redução de parâmetros. Enquanto o modelo 1 é composto por 43,28 milhões de parâmetros, o modelo 2 foi construído com 9,89 milhões de parâmetros, demonstrando que a arquitetura de *inception* é capaz de gerar resultados com melhor acurácia enquanto mantém o modelo da rede neural mais leve, o que torna uma abordagem mais eficiente.

4 CONCLUSÕES

Ao decorrer do trabalho foram propostas duas arquiteturas customizadas baseadas no conceito de Network-In-Network onde em um segundo modelo é adicionado o conceito de *inception*. Os resultados indicaram que o conceito de *inception* aplicado no modelo 2 gera resultados com maior acurácia e capacidade de generalização, mesmo com uma arquitetura com quantidade de parâmetros 4,37 vezes menor, demonstrando-se como uma arquitetura bem eficiente na classificação de problemas que envolvem imagens.

Em futuros trabalhos é possível explorar a aplicação do conceito de visão computacional para classificação da qualidade final dos processos de fabricação, um exemplo promissor que se tem interesse é classificação de defeitos de solda que pode ser feita utilizando um banco de dados com 744 imagens disponível publicamente por RoboFlow Universe (2021), por meio do qual podem ser classificados até oito defeitos de solda, a porosidade, mordedura, descontinuidade, trinca, defeitos genéricos, sobreposição, inclusão de escória, fusão incompleta.

REFERÊNCIAS

- LECUN, Y.; BENGIO, Y.; HINTON, G. Deep learning. *Nature*, London, v. 521, n. 7553, p. 436–444, 2015.
- GOODFELLOW, I.; BENGIO, Y.; COURVILLE, A. *Deep Learning*. Cambridge: MIT Press, 2016.
- LIN, M.; CHEN, Q.; YAN, S. Network In Network. *International Conference on Learning Representations (ICLR)*, 2013. ICLR, arXiv:1312.4400.
- SZEGEDY, C. et al. Going deeper with convolutions. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Boston, 2015. Boston: IEEE, 2015. p. 1–9.
- DENG, J. et al. ImageNet: A large-scale hierarchical image database. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Miami, 2009. IEEE, 2009. p. 248–255.
- GLOROT, X.; BENGIO, Y. Understanding the difficulty of training deep feedforward neural networks. *Proceedings of the thirteenth international conference on artificial intelligence and statistics*, Sardinia, 2010. AISTATS, 2010. p.

- HE, K.; ZHANG, X.; REN, S.; SUN, J. Delving deep into rectifiers: Surpassing human-level performance on ImageNet classification. IEE International Conference on Computer Vision, Santiago, 2015. IEEE, 2015. 1026-1034.
- LOSHCHILOV, I.; HUTTER, F. Decoupled weight decay regularization. 2017. arXiv preprint arXiv:1711.05101.
- WELDING DEFECT. Welding Defect Dataset. Roboflow Universe, nov. 2021. Disponível em: <https://universe.roboflow.com/welding-defect/welding-defect-tpfif>. Acesso em: 13 out. 2025.



AVALIAÇÃO DA INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA NO COMPORTAMENTO DINÂMICO DE UM MONOPILAR PARA TORRE EÓLICA DE 15 MW

¹ Gino B. Colherinhas, ¹ Jordana F. Rezio

¹ Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação, Universidade Federal de Goiás
Alameda Ingá, Prédio B5, Campus Samambaia, 74045-155. Goiânia, Goiás, Brasil

gino@ufg.br, jordanarezio@discente.ufg.br

DOI: 10.5281/zenodo.19041234

Resumo. Este artigo avalia a influência da interação solo-estrutura no comportamento dinâmico de um monopilar para torre eólica offshore de 15 MW. Utiliza-se a modelagem por elementos finitos executada via PyMAPDL para comparar os cenários de base engastada e base flexível, considerando molas distribuídas para representar a rigidez do solo. A análise modal revela que a consideração da interação solo-estrutura provoca um abatimento de 5,1% na frequência natural fundamental, reduzindo-a de 0,178 Hz para 0,169 Hz, aproximando-se do valor de referência de 0,170 Hz do modelo IEA. Os resultados demonstram a importância de incluir os efeitos da interação solo-estrutura em etapas avançadas de projeto para uma previsão realista da resposta dinâmica e evitar riscos de ressonância. Conclui-se que a metodologia implementada é válida e que estudos futuros devem investigar parâmetros geotécnicos e geométricos adicionais para melhor aproximação ao benchmark estabelecido.

Palavras-chave: Torres eólicas offshore. Interação Solo-Estrutura. Dinâmica Estrutural. Fundações Offshore. PyMAPDL.

1 INTRODUÇÃO

A demanda global por energia renovável impulsiona o desenvolvimento de parques eólicos offshore, com turbinas de grande porte como o modelo IEA 15 MW (GAERTNER et al., 2020).

No Brasil, iniciativas recentes reforçam a relevância nacional desse tema e a necessidade de domínio tecnológico associado à confiabilidade estrutural.

Nesse cenário, as fundações monopilares são uma solução em águas rasas e intermediárias (RIBEIRO et al., 2025). No entanto, essas estruturas estão sujeitas a carregamentos ambientais complexos e cíclicos, tornando-as vulneráveis a falhas por fadiga e flambagem (GENTILS; WANG; KOLIOS, 2017), o que pode comprometer sua estabilidade e vida útil.

A precisão na previsão das frequências naturais é vital para evitar ressonância com as excitações do rotor (1P) e das pás (3P). A Interação Solo-Estrutura (ISE) é um fator crucial nesta análise, podendo reduzir a frequência fundamental em 4,3% a 17,2% conforme Abdullahi et al. (2020) e Ferreira et al. (2022), sendo, portanto, indispensável em projetos de turbinas de grande porte para mitigar riscos de fadiga e ressonância.

Diante da complexidade da modelagem da ISE, abordagens computacionais eficientes têm sido desenvolvidas, como os modelos de ordem reduzida de Ferreira et al. (2022) e Abdullahi et al. (2020). Estes fornecem a base metodológica que justifica o uso de ferramentas como o PyMAPDL para análises modais detalhadas da interação solo-monopilar.

Diante desse desafio, este artigo tem como objetivo avaliar a dinâmica estrutural de um monopilar para a turbina IEA 15 MW, com foco específico na sua resposta dinâmica (frequências e modos de vibração). Utiliza-se modelagem por elementos finitos da torre e do monopilar, considerando a interação solo-estrutura.

Situada no âmbito de um projeto de pós-graduação, esta pesquisa busca contribuir para o corpo de conhecimento técnico-científico e oferecer subsídios para futuros projetos normativos no Brasil.

A presente pesquisa situa-se no âmbito do projeto de modelagem e otimização de torres eólicas desenvolvido no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFG, e busca contribuir para o corpo de conhecimento técnico-científico na área, oferecer subsídios para futuros projetos normativos no dimensionamento de fundações offshore em condições tipicamente brasileiras.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 A Turbina Eólica de Referência NREL 15-MW

As turbinas eólicas offshore de grande porte, como o modelo de referência NREL 15-MW (GAERTNER et al., 2020), representam a fronteira da geração de energia renovável. Concebida

para operar em profundidades de 50 a 200 metros, esta turbina é compatível com diversas fundações, destacando-se o monopilar para águas mais rasas.

A estabilidade dessas estruturas depende criticamente da correta modelagem da fundação e da interação com o solo (ARANY et al., 2017). O comportamento do monopilar, solução mais comum em águas rasas, é altamente influenciado pelas propriedades geotécnicas do local (DNVGL, 2017).

A torre do NREL 15-MW é uma estrutura tubular de aço de aproximadamente 135 metros de altura, projetada conforme os critérios das normas IEC 61400-6 (2020) e DNVGL (2017). Suas propriedades modais – frequências naturais e modos de vibração – são críticas para evitar ressonância com as excitações ambientais e do rotor (ALVES RIBEIRO, J. et al., 2025).

Como pode ser observado na Figura 1, o projeto de turbinas eólicas offshore exige um rigoroso controle de frequências. A frequência natural fundamental da estrutura deve estar situada entre as faixas de excitação 1P (rotação do rotor) e 3P (passagem das pás) para evitar ressonância, conforme exemplificado pelo projeto de referência que a posicionou em 0,170 Hz. Esta estratégia também isola a estrutura das frequências predominantes das ondas. É crucial destacar que o uso de uma subestrutura flutuante, diferentemente de um monopilar fixo, altera radicalmente as condições de contorno, demandando uma torre com maior rigidez (GAERTNER et al., 2020).

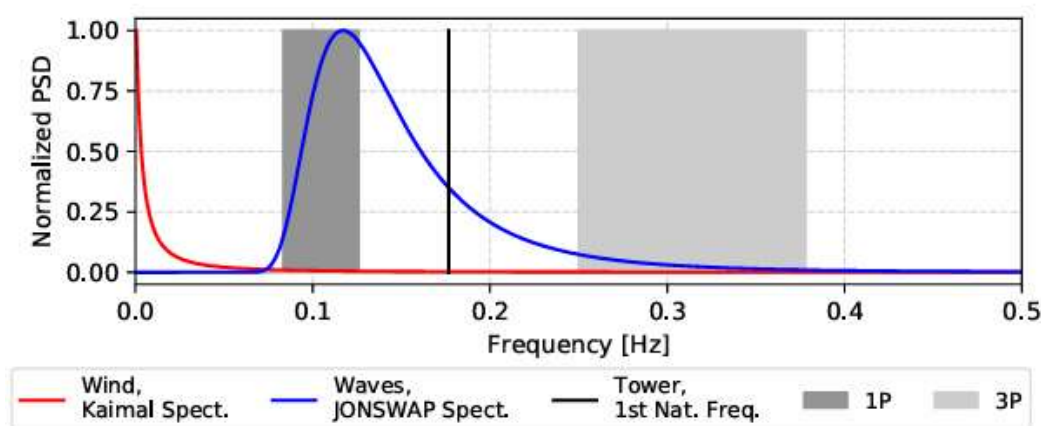


Figura 1. Frequência natural da torre em relação à densidade espectral de potência (PSD) normalizada das frequências de excitação.

O monopilar é uma estaca de grande diâmetro cravada no leito marinho. Suas dimensões típicas para suportar a turbina de 15 MW incluem, conforme Figura 2: Diâmetro: 10 m; Espessura da parede: 41–55 mm; Comprimento de cravação: 45 m (dependente do tipo de solo).

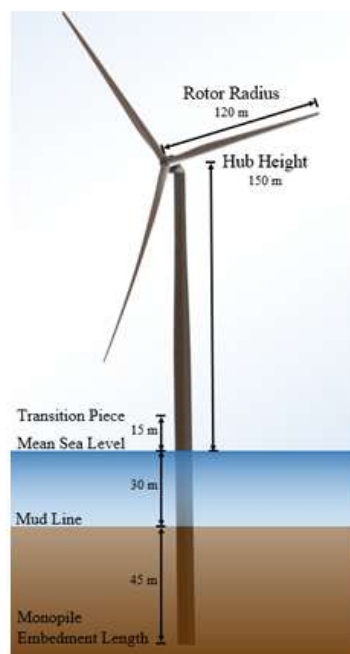


Figura 2. Turbina eólica de referência IEA WIND 15-MW (GAERTNER et al., 2020)

O projeto da fundação deve considerar a Interação Solo-Estrutura (ISE), crucial para a resposta dinâmica do sistema (ARANY et al., 2017). Para representar esse fenômeno, utilizam-se modelos como o de Winkler, que simula o solo por meio de molas elásticas distribuídas ao longo do fuste enterrado (FIGUEIREDO, 2018). A rigidez dessas molas é determinada por relações semiempíricas, conforme estabelecido pela norma IEC 61400-6 (2020).

2.2 Análise Estrutural

A análise do comportamento real de turbinas sob carregamentos ambientais exige ferramentas integradas como o OpenFAST. Para estudos estruturais detalhados, o Método de Elementos Finitos (MEF) é fundamental, sendo implementado por meio de ferramentas como o ANSYS APDL (automatizado via PyMAPDL) para análises de tensão, flambagem, fadiga e, crucialmente, análise modal. A análise modal identifica as frequências naturais e modos de vibração, parâmetros vitais para evitar a ressonância. A comparação entre modelos de base engastada e flexível permite quantificar o impacto significativo da Interação Solo-Estrutura (ISE) na resposta dinâmica do sistema.

3 METODOLOGIA

3.1 Modelo Numérico e Ferramentas Computacionais

Para avaliar o impacto da interação solo-estrutura (ISE) no comportamento dinâmico do monopilar para a turbina eólica offshore IEA 15 MW, foi desenvolvido um modelo numérico tridimensional em elementos finitos utilizando a biblioteca PyMAPDL (ANSYS Parametric Design Language via Python). A escolha dessa ferramenta justifica-se pela sua capacidade de automação, reprodutibilidade e integração com workflows de análise estrutural avançada.

3.2 Geometria e Propriedades dos Materiais

Torre e monopilar foram modelados como cascas cilíndricas de aço com espessuras variáveis, conforme especificações do modelo IEA 15 MW. E a fundação no solo foi modelada com uma série de constantes de mola para representar a rigidez do solo em um modelo de elementos finitos unidimensional. Os valores sumários selecionados para o módulo de cisalhamento do solo e o coeficiente de Poisson são representativos de solos de areia densa ou cascalho.

As propriedades do material utilizadas foram: Módulo de Elasticidade (Young - E) do aço ($2,00 \cdot 10^{11}$ Pa (Pascal)); Módulo de Cisalhamento do aço (G) ($7,93 \cdot 10^{10}$ Pa); Densidade do aço (ρ) (7850 kg/m^3); Módulo de Cisalhamento do solo (G_s) ($140 \cdot 10^6$ Pa) e Coeficiente de Poisson do solo (ν_s) (0,4) (GAERTNER et al., 2020).

3.3 Análise Modal

Executou-se uma análise modal comparando dois cenários: base engastada e base flexível com ISE, utilizando molas distribuídas no trecho enterrado do monopilar. Para permitir a comparação direta com o modelo de referência IEA 15 MW e futura integração com ferramentas como o OpenFAST, as formas modais obtidas foram normalizadas conforme metodologia estabelecida.

A normalização é realizada separadamente para os modos de vibração nas direções Front-Aft (FA) e Side-Side (SS), com base nos deslocamentos e rotações nodais extraídos do modelo de elementos finitos. O procedimento considera a altura normalizada da torre, definida como:

$$h_{norm}(i) = \frac{h(i)-15}{148,659-15} \quad (1)$$

Onde $h(i)$ é a altura ao longo da torre, variando de -30 m a 148,659 m, sendo que a base da torre propriamente dita se inicia em $h=15$ m.

Para os modos 1 e 2 na direção FA, são utilizados os seguintes dados nodais: U_2 : deslocamento na direção SS; U_3 : deslocamento vertical; R_1 : rotação em torno do eixo SS.

O procedimento de normalização é realizado em quatro etapas:

- Correção do deslocamento horizontal:

$$U_{2,shift}(i) = U_2(i) - U_2(h = 15m) \quad (2)$$

- Correção do deslocamento vertical:

$$U_{3h}(i) = U_3(i) + h(i) \quad (3)$$

$$U_{3,shift}(i) = U_{3h}(i) - U_{3h}(h = 15m) \quad (4)$$

- Rotação do sistema de coordenadas:

$$U_{2,rot}(i) = U_{2,shift}(i) \cos(R_1(i)) - U_{3,shift}(i) \sin(R_1(i)) \quad (5)$$

- Normalização final:

$$U_{2,norm}(i) = \frac{U_{2,rot}(i)}{U_{2,rot}(h=148,659m)} \quad (6)$$

Esse procedimento garante que as formas modais estejam normalizadas em relação ao deslocamento no topo da torre ($h = 148,659m$), permitindo a comparação consistente com modelos de referência e a utilização em ferramentas de dinâmica estrutural acoplada como o OpenFAST.

As rigidezes do solo para fundações circulares foram determinadas por expressões semiempíricas da IEA Wind e Arany et al. (2017), calculando-se os valores nas direções vertical, horizontal, rotação e torção mediante fatores de correção (η) dependentes da geometria e propriedades do solo. Esta abordagem, representada matricialmente na Figura 3, constitui um método robusto e consolidado para análise dinâmica de turbinas eólicas offshore.

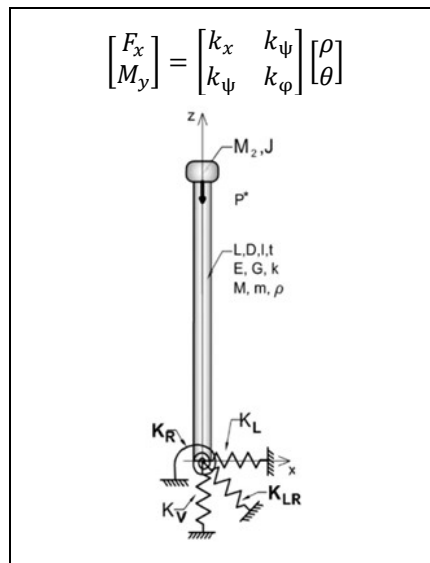


Figura 3. Configuração da rigidez da fundação (Adaptado de ARANY et al, 2017)

O pré-processamento foi composto pelas etapas: (i) Definição dos parâmetros geométricos e materiais; (ii) Criação da geometria e malha estruturada com elementos os elementos BEAM188 (torre e monopilar), MASS21 (massa do hub e da nacelle e a peça de transição entre a torre e o monopilar) e MATRIX27 (fundação flexível); (iii) Aplicação das condições de contorno de base engastada ou flexível; (iv) As equações para as constantes de rigidez do solo foram:

- Rigidez Horizontal: Rigidez do solo na direção lateral para estruturas circulares

$$\eta_x = 1 + 0,55 (2 - \nu) \frac{h}{r_0} \quad (7)$$

$$k_x = \frac{32 (1-\nu) G r_0}{7 - 8\nu} \eta_x \quad (8)$$

- Rigidez Vertical: Rigidez do solo na direção vertical para estruturas circulares

$$\eta_z = 1 + 0,6 (1 - \nu) \frac{h}{r_0} \quad (9)$$

$$k_z = \frac{4G r_0}{7 - \nu} \eta_z \quad (10)$$

- Rigidez à Rotação: Rigidez do solo na direção de rotação para estruturas circulares

$$\eta_\psi = 1 + \left[1,2 (1 - \nu) \left(\frac{h}{r_0} \right) \right] + [0,2 (2 - \nu) \left(\frac{h}{r_0} \right)^3] \quad (11)$$

$$k_\psi = \frac{8G r_0^3}{3 (1-\nu)} \eta_\psi \quad (12)$$

- Rigidez Torsional: Rigidez do solo na direção torsional para estruturas circulares

$$k_\varphi = \frac{16G r_0^3}{3} \quad (13)$$

Legenda dos símbolos:

G: Módulo de cisalhamento do solo;

r_0 : Raio da fundação;

ν : Coeficiente de Poisson;

h: Profundidade de embutimento;

η : Fator de correção de rigidez.

A análise modal foi realizada com a extração dos primeiros modos de vibração e frequências naturais. Já o pós processamento incluiu: (i) Comparação dos resultados com os valores de referência do IEA 15 MW; (ii) Análise de sensibilidade da rigidez do solo; (iii) Comparação entre o valor da frequência natural da torre com base fixa e a com base flexível.

O modelo foi validado comparando-se as frequências naturais obtidas com os resultados publicados por Gaertner et al. (2020) para a mesma turbina em condição de base engastada.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise modal confirmou o impacto da interação solo-estrutura (ISE), com as frequências naturais apresentando um abatimento de 5,1% no modo fundamental (de 0,178 Hz para 0,169 Hz) devido ao aumento da flexibilidade do sistema, conforme Figura 4 e Figura 5.

O modelo numérico em PyMAPDL mostrou excelente concordância com os resultados de referência do OpenFAST (0,178 Hz vs. 0,175 Hz), validando a metodologia. A consideração da ISE através do modelo de molas distribuídas, cujas rigidezes foram calculadas conforme a metodologia da IEA Wind e ARANY et al. (2017), resultou nos seguintes valores para a fundação: Rigidez Vertical (K_v): 197,87 MN/m; Rigidez Horizontal (K_L): 315,49 MN/m; Rigidez à Rotação (K_{LR}): 187.257,78 MNm/rad; Rigidez Torsional (K_R): 933,33 MNm/rad.

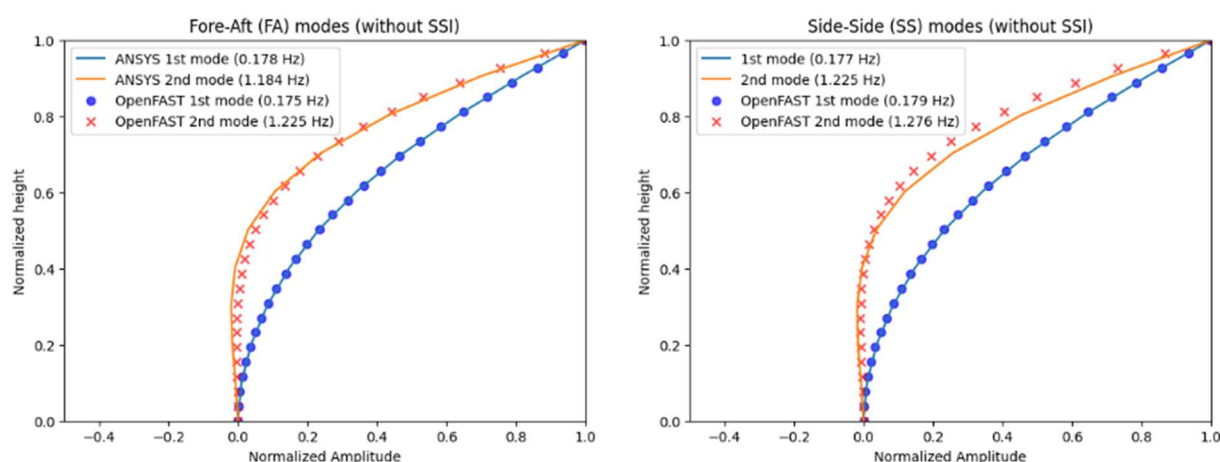


Figura 4. Representação gráfica da frequência natural, com os dados do OPENFAST e do PyMAPDL sem interação solo-estrutura. (PRÓPRIA, 2025)

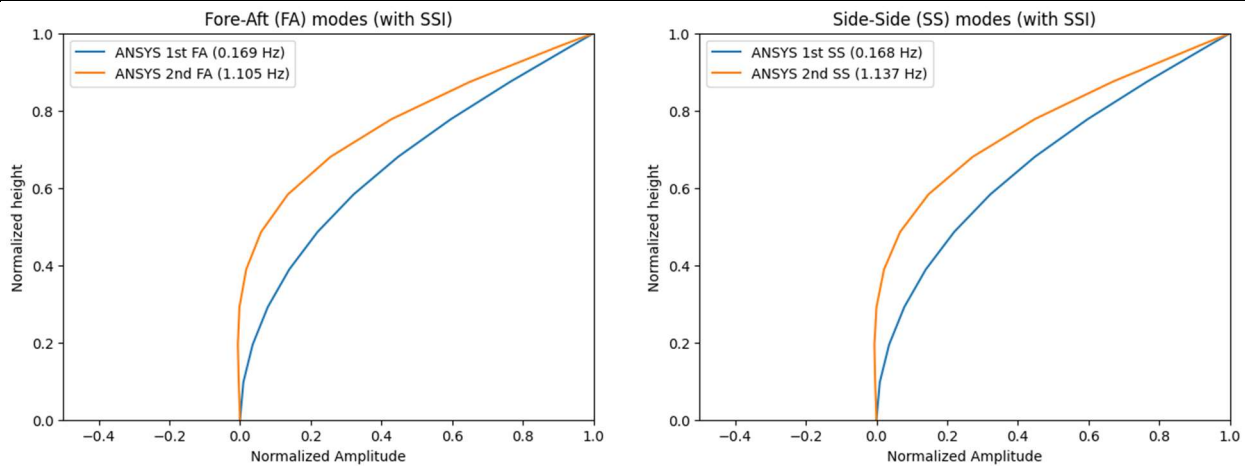


Figura 5. Representação gráfica da frequência natural, com os dados calculados no VS CODE com interação solo-estrutura. (PRÓPRIA, 2025)

A modelagem com base fixa, ainda que útil em etapas iniciais, superestima as frequências naturais por ignorar a flexibilidade do solo. A consideração da ISE mostrou-se crucial para prever com realismo o comportamento dinâmico, evitando que a estrutura opere próximo a faixas de excitação crítica (como 3P) e reduzindo o risco de fadiga.

5 CONCLUSÕES

Este estudo avaliou a influência da Interação Solo-Estrutura (ISE) na dinâmica de um monopilar para turbina eólica offshore de 15 MW. A análise com PyMAPDL confirmou que a ISE é crucial para uma previsão acurada, resultando em um abatimento de 5,1% na frequência fundamental (de 0.178 Hz – base rígida - para 0.169 Hz – base engastada). Esse valor se aproxima do resultado de referência do modelo IEA (0,170 Hz), validando a metodologia adotada.

Recomenda-se, para estudos futuros, a investigação de perfis geotécnicos mais complexos (multicamadas ou não lineares) e a realização de análises de sensibilidade sobre parâmetros geométricos e de rigidez do solo, visando uma aproximação ainda maior ao comportamento dinâmico de referência.

Agradecimentos. Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo essencial apoio financeiro por meio da concessão de bolsa de estudos, que viabilizou a realização desta pesquisa. Agradecemos sinceramente ao Prof. Dr. Gino B. Colherinhas pela valiosa orientação, dedicação e pelos ensinamentos ao longo deste trabalho. Registramos, ainda, nossa gratidão ao Programa de Pós-Graduação

PPGMEC-2025

em Engenharia Mecânica (PPGMEC) da Universidade Federal de Goiás (UFG) pela oportunidade, pela infraestrutura proporcionada e pelo ambiente acadêmico propício ao desenvolvimento deste estudo.

REFERÊNCIAS

- ABDULLAHI, A.; WANG, Y.; BHATTACHARYA, S. Comparative Modal Analysis of Monopile and Jacket Supported Offshore Wind Turbines including Soil-Structure Interaction. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, v. 20, n. 4, 2020. DOI: 10.1142/S021945542042016X
- ALVES RIBEIRO, J. et al. Offshore wind turbine tower design and optimization: A review and AI-driven future directions. *Applied Energy*, v. 397, p. 126294, 2025.
- ARANY, L. et al. Closed form solution of eigen frequency of monopile supported offshore wind turbines in deeper waters incorporating stiffness of substructure and SSI. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, v. 83, p. 18-32, 2016. DOI: 10.1016/j.soildyn.2015.12.011, 2017.
- BORRI, C.; PASTÒ, S. *Lezioni di ingegneria del vento*. v. 1. Firenze: Firenze University Press, 2006.
- COLHERINHAS, G. B. et al. Modeling and dynamic analysis of 15 and 22-megawatt offshore wind turbines using pymapdl. In: CONGRESSO IBERO-LATINO-AMERICANO DE MÉTODOS COMPUTACIONAIS EM ENGENHARIA (CILAMCE), 45., 2024, Maceió. Anais[...]. Maceió: ABMEC, 2024.
- DNV GL. DNVGL-RP-C205: Environmental conditions and environmental loads. Høvik: DNV GL, 2017.
- FERREIRA, Y. A. et al. A reduced-order model to predict the natural frequencies of offshore wind turbines considering soil-structure interaction. *Marine Systems & Ocean Technology*, v. 17, p. 80–94, 2022. DOI: 10.1007/s40868-022-00116-z.
- FIGUEIREDO, S. P. *Interação Solo-Estrutura em Fundações de Turbinas Eólicas*. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 2018.
- GAERTNER, E. et al. Definition of the IEA 15-megawatt offshore reference wind turbine. Golden: National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2020.
- GENTILS, T.; WANG, L.; KOLIOS, A. Integrated structural optimisation of offshore wind turbine support structures based on finite element analysis and genetic algorithm. *Applied Energy*, v. 199, p. 187–204, 2017. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.05.015.
- INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 61400-3: Wind energy generation systems –Part 3: Design requirements for offshore wind turbines. Geneva: IEC, 2009.
- INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 61400-6: Wind energy generation systems – Part 6: Tower and foundation design. Geneva: IEC, 2020.
- JENKINS, N. et al. *Wind Energy Handbook*. 3. ed. Hoboken: Wiley, 2021.
- MENDES, M. V.; COLHERINHAS, G. B. Optimum TLCD for Mitigation of Offshore Wind Turbine Dynamic Response Considering Soil-Structure Interaction. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, v. 23, n. 5, 2023. DOI: 10.1142/S0219455423501756.
- MORIARTY, P. J.; HANSEN, A. C. *AeroDyn Theory Manual*. Golden: National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2005. (NREL/TP-500-36881).
- TARIQ, H. et al. Integrated sizing and vibration control of monopile IEA-15MW benchmark offshore wind turbine. In: ECCOMAS THEMATIC CONFERENCE ON COMPUTATIONAL METHODS IN STRUCTURAL DYNAMICS AND EARTHQUAKE ENGINEERING (COMPDYN), 10., 2025, Rhodes Island. Proceedings[...] Rhodes Island: ECCOMAS, 2025. p. 1–18.
- ZHANG, Z.; DE RISI, R.; SEXTOS, A. Multi-hazard fragility assessment of monopile offshore wind turbines under earthquake, wind and wave loads. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, v. 52, n. 9, p. 2658–2681, 2023. DOI: 10.1002/eqe.3891.



AValiação EXPERIMENTAL DA PERDA DE TRANSMISSÃO EM SILENCIADORES COM TUBO PERFURADO E Lã DE VIDRO

¹ Cordeiro B. S., ¹ Rodrigues M. V. S., ¹ Fagundes Neto M. G.

*¹ Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação, Universidade Federal de Goiás
Av. Esperança, s/n - Chácara de Recreio Samambaia, 74690-900, Goiânia-GO – Brasil*

cordeirosilva@discente.ufg.br, silva_vinicius@discente.ufg.br, marlipe@ufg.br

DOI: 10.5281/zenodo.19041632

Resumo. Neste estudo será investigado investiga-se o desempenho acústico de silenciadores do tipo câmara de expansão modificada, avaliando os efeitos da utilização de lã de vidro e de um tubo perfurado em sua configuração interna – uma simplificação de um silencioso acústico de grupo moto geradores. Para tanto, adotou-se um planejamento experimental fatorial 2×2 , resultando em quatro modelos: (i) câmara de expansão simples, (ii) câmara com tubo perfurado, (iii) câmara com lã de vidro e (iv) câmara com a combinação de ambos. Os protótipos foram ensaiados em um tubo de impedância conforme a ISO 10534-2, utilizando excitação por ruído branco na faixa de 0–6000 Hz. As variáveis geométricas principais foram: comprimento da câmara, comprimento do tubo perfurado, diâmetro da câmara, diâmetro do tubo perfurado e diâmetro dos furos. A lã de vidro, quando presente, foi posicionada no espaço anular. Cada modelo foi ensaiado três vezes, permitindo análise da consistência dos resultados. Como variável de resposta, considerou-se a Perda de Transmissão Sonora (TL), analisada em termos de valores médios, bem como em baixas ($< 2000\text{ Hz}$), médias ($2000 - 4000\text{ Hz}$) e altas frequências ($> 4000\text{ Hz}$). Os resultados, como maior influência positiva com a presença de material absorvivo na perda de transmissão sonora, contribuem para a compreensão do comportamento acústico de materiais porosos e tubos perfurados aplicados a silenciadores, além de fornecer subsídios para o desenvolvimento de soluções híbridas de controle de ruído em sistemas de exaustão.

Palavras-chave: Silenciadores acústicos; perda de transmissão sonora; lã de vidro; tubo perfurado; controle de ruído.

1 INTRODUÇÃO

O controle de ruído é um tema de crescente relevância em aplicações de engenharia, dada a necessidade de atender a requisitos de conforto acústico, normas ambientais e saúde ocupacional. Entre as diversas estratégias de mitigação sonora, os silenciadores ocupam papel de destaque por sua versatilidade e eficácia em sistemas de exaustão, ventilação e geração de energia (Munjal, 1987).

Dentre os diversos tipos de silenciadores, as câmaras de expansão constituem solução amplamente utilizada devido à sua simplicidade construtiva e capacidade de atenuação em determinadas faixas de frequência. Contudo, silenciadores puramente reativos apresentam limitações em termos de largura de banda e desempenho em médias e altas frequências (Munjal, 2014). Nesse contexto, surge o interesse em soluções híbridas, que combinam mecanismos reativos e dissipativos para ampliar a eficiência global.

Do ponto de vista dissipativo, o uso de materiais porosos fibrosos, como a lã de vidro, é consolidado na literatura como alternativa de baixo custo e elevado desempenho, sobretudo em médias e altas frequências (Allard & Atalla, 2009). Em paralelo, os tubos microperfurados, introduzidos por Maa (1998), representam uma alternativa promissora aos materiais fibrosos tradicionais, com vantagens adicionais de durabilidade, estabilidade mecânica e resistência a ambientes severos. Estudos recentes têm demonstrado que a combinação de elementos perfurados com materiais porosos pode resultar em efeitos sinérgicos de absorção e perda de transmissão sonora (Yang & Sheng, 2017).

Apesar dos avanços, ainda são escassos os trabalhos que investigam experimentalmente, de forma sistemática, a interação entre lã de vidro e tubos perfurados (furos maiores que 1 mm) em silenciadores do tipo câmara de expansão, sobretudo utilizando metodologias de planejamento experimental que permitam quantificar os efeitos individuais e combinados desses fatores.

Neste contexto, o presente estudo tem como objetivo avaliar experimentalmente o desempenho acústico de silenciadores do tipo câmara de expansão modificada, considerando a presença de lã de vidro e de um tubo perfurado central. Para tanto, foi adotado um planejamento fatorial 2×2 , resultando em quatro modelos testados em tubo de impedância conforme a norma ISO 10534-2. A resposta de interesse foi a Perda de Transmissão Sonora (PT), analisada em termos médios, em baixas, médias e altas frequências. Os resultados obtidos contribuem para a compreensão dos efeitos isolados e combinados dos dois dispositivos, além de oferecer subsídios para o projeto de soluções híbridas (Figura 1) de controle de ruído em aplicações práticas.

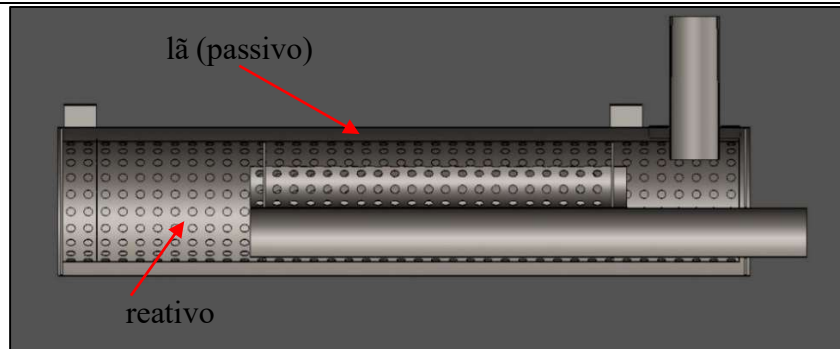


Figura 9. Modelo de silenciador híbrido usado em grupo moto-gerador (Próprios autores)

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os silenciadores acústicos tradicionalmente classificam-se em reativos, que exploram efeitos de reflexão e ressonância, e dissipativos, que convertem energia sonora em calor por meio da fricção viscosa em materiais porosos (Munjal, 1987; Bies & Hansen, 2009).

Entre os modelos reativos, as câmaras de expansão, ilustrada na Figura 2, são amplamente utilizadas devido à simplicidade construtiva e à eficácia na atenuação em determinadas faixas de frequência, especialmente em baixas e médias frequências. Contudo, apresentam limitação de largura de banda, tornando desejável a incorporação de mecanismos dissipativos para ampliar o espectro de atuação (Munjal, 2014).

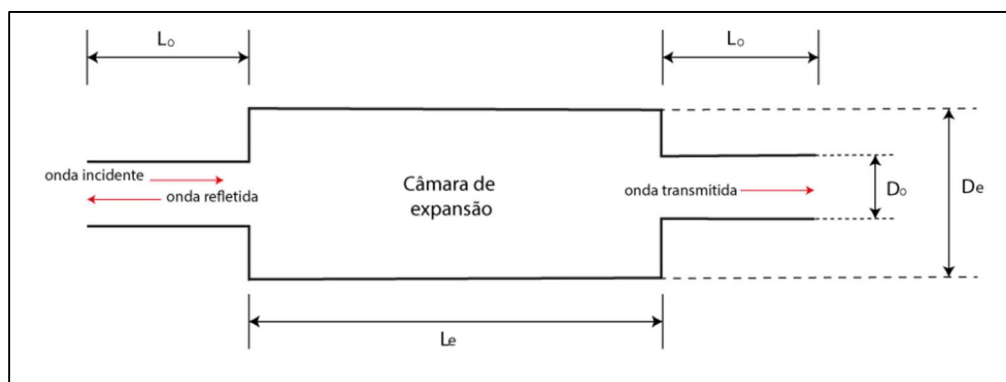


Figura 10. Câmara de expansão simples (Fonte: Monteiro, 2022)

Os materiais porosos fibrosos, como a lã de vidro, são largamente empregados em engenharia acústica por seu desempenho elevado em médias e altas frequências. O mecanismo de absorção está associado à conversão da energia sonora em calor devido às perdas por atrito viscoso e condução térmica nas fibras do material (Allard & Atalla, 2009).

A eficácia de um material poroso depende de parâmetros como espessura, resistividade ao fluxo, densidade aparente e porosidade (Delany & Bazley, 1970; Allard & Atalla, 2009). Estudos indicam que o posicionamento do material no interior do silenciador pode potencializar o acoplamento entre o campo acústico interno e o meio poroso, resultando em maior atenuação (Sullivan, 1971).

Apesar das vantagens, materiais fibrosos apresentam desvantagens práticas, como degradação em ambientes agressivos (principalmente temperaturas altas), dificuldade de manutenção e possível liberação de partículas, o que tem motivado a busca por alternativas complementares, como painéis e tubos perfurados.

3 METODOLOGIA

O estudo foi conduzido em um tubo de impedância, conforme a Figura 3, conforme recomendações da ISO 10534-2 (1998), possibilitando a determinação da Perda de Transmissão Sonora (PT) em função da frequência. O objetivo central foi avaliar os efeitos da lã de vidro e do tubo perfurado em silenciadores do tipo câmara de expansão, analisando separadamente e em combinação os mecanismos de atenuação reativos e dissipativos.

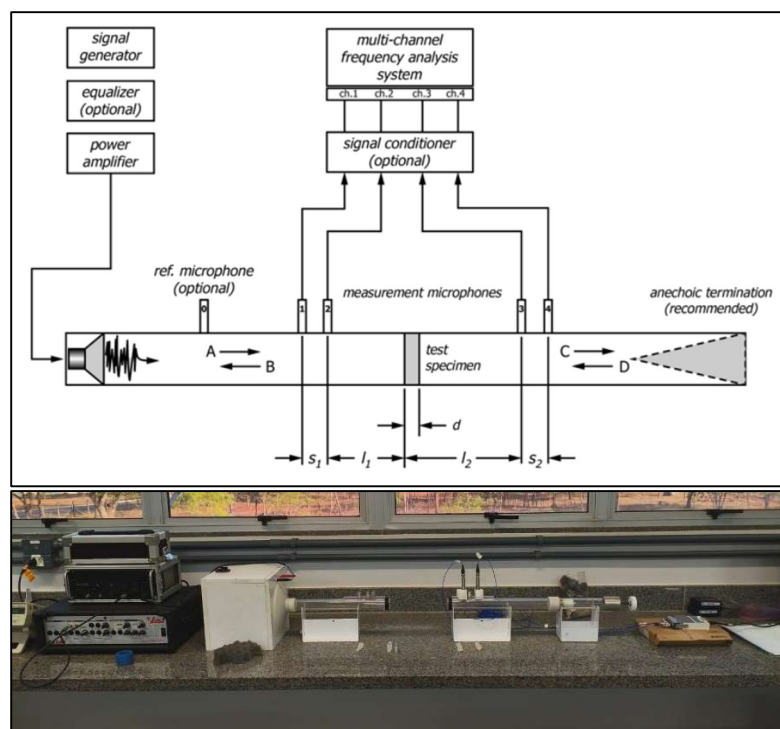


Figura 11. Esquema tubo de impedância (A), tubo de impedância real (B) (ASTM E2611 – 09, 2009, adaptado)

3.1 Planejamento experimental

Foi adotado um planejamento fatorial completo 2×2 , no qual foram definidos dois fatores de interesse:

Fator A: presença (+1) ou ausência (-1) de lã de vidro.

Fator B: presença (+1) ou ausência (-1) de tubo perfurado.

A partir desses fatores, foram fabricados quatro modelos experimentais:

- Modelo 1 – Câmara de expansão simples (sem lã e sem tubo perfurado).
- Modelo 2 – Câmara de expansão com tubo perfurado (sem lã).
- Modelo 3 – Câmara de expansão com lã de vidro (sem tubo perfurado).
- Modelo 4 – Câmara de expansão com lã de vidro e tubo perfurado.

Cada configuração foi ensaiada três vezes de forma aleatória, permitindo a verificação da consistência experimental e a obtenção de medidas mais confiáveis da resposta acústica.

3.2 Geometria dos protótipos

Os protótipos foram construídos com dimensões controladas, descritas a seguir:

- $L_1 = 205 \text{ mm}$: comprimento da câmara de expansão.
- $L_2 = 205 \text{ mm}$: comprimento do tubo perfurado.
- $D_1 = 150 \text{ mm}$: diâmetro interno da câmara de expansão.
- $D_2 = 50,8 \text{ mm}$: diâmetro externo do tubo perfurado.
- $d = 8,00 \text{ mm}$: diâmetro dos furos do tubo perfurado.

Quando presente, a lã de vidro foi alocada no espaço anular entre o tubo perfurado e a parede interna da câmara de expansão, resultando em uma espessura de:

$$e = \frac{D_1 - D_2}{2}. \quad (1)$$

Os modelos fabricados ficaram como os apresentados na Figura 4:



Figura 12. Modelos Fabricados (Próprios Autores)

3.3 Procedimento experimental

A excitação sonora foi realizada com ruído branco, de modo a garantir distribuição espectral uniforme ao longo da faixa de interesse. O sistema de aquisição incluiu microfones posicionados a montante e a jusante da amostra, possibilitando o cálculo da função de transferência acústica e, a partir desta, a obtenção da Perda de Transmissão (PT).

A faixa de frequência analisada foi de 0 a 6000 Hz, abrangendo:

- Baixas frequências: $f < 2000 \text{ Hz}$
- Médias frequências: $2000 \leq f < 4000 \text{ Hz}$
- Altas frequências: $f \geq 4000 \text{ Hz}$

3.4 Variável de resposta

A principal variável de resposta foi a Perda de Transmissão Sonora (PT), determinada a partir da diferença entre o nível de potência sonora incidente e transmitido pelo silenciador. Para análise comparativa entre os modelos, a PT foi calculada em três formas:

- PT média global (na faixa completa de 0–6000 Hz).
- PT por faixa de frequência (baixa, média e alta).
- PT em função da presença, ausência e interação entre espuma e tubo, para caracterização detalhada do desempenho de cada configuração.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise do diagrama de extremos (Figura 5) confirma a predominância do fator espuma sobre os níveis de TL em todas as faixas de frequência. A presença da espuma promoveu aumentos significativos de desempenho, enquanto o tubo apresentou efeito oposto, reduzindo os ganhos proporcionados pela espuma, sobretudo em médias e altas frequências. Observa-se que a condição ótima foi obtida com espuma presente e tubo ausente, resultando nos maiores valores medianos de TL, com picos próximos a 50 dB. Já a ausência de espuma levou a resultados consistentemente baixos, independentemente da configuração do tubo.

De acordo com a Figura 6A evidenciou que apenas o fator Espuma apresentou efeito estatisticamente significativo ($t \approx 5 > t_{crit} = 2,448, \alpha = 0,05$), indicando influência direta e relevante sobre a variável de interesse. Em contrapartida, o fator Tubo e a interação AB exibiram efeitos padronizados de baixa magnitude, não ultrapassando o limite crítico de significância, o que demonstra ausência de impacto relevante na resposta.

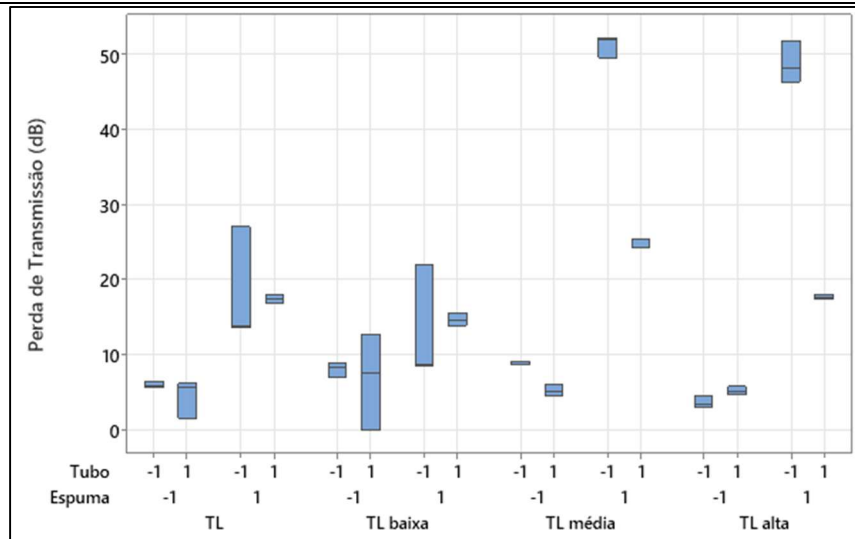


Figura 13. Diagrama de extremos dos modelos ensaiados em diferentes faixas. Fonte: Os autores

Para a resposta TL em baixas frequências, a análise dos efeitos padronizados (Figura 6B) indicou que nenhum dos fatores ou interações ultrapassou o limite crítico de significância. O fator Espuma (A) apresentou a maior contribuição relativa, com efeito padronizado de aproximadamente 1,9, seguido pela interação AB e pelo fator Tubo (B), ambos de magnitude reduzida. Esses resultados sugerem que, embora a presença da espuma possa exercer alguma influência sobre a atenuação em baixas frequências, tal efeito não se mostrou estatisticamente relevante dentro do intervalo de confiança adotado.

A análise dos efeitos padronizados para a resposta TL média (Figura 6C) revelou que todos os termos do planejamento fatorial apresentaram significância estatística ao nível de 95%. O fator Espuma (A) apresentou o maior efeito padronizado (~55), confirmando sua predominância sobre a resposta, seguido pelo fator Tubo (B) (~25) e pela interação AB (~20). Além disso, na TL média o tubo também se mostrou relevante, além de existir uma interação significativa entre os fatores. Esses resultados indicam que o desempenho acústico médio depende da combinação entre espuma e tubo, que modifica de maneira não aditiva o comportamento da resposta.

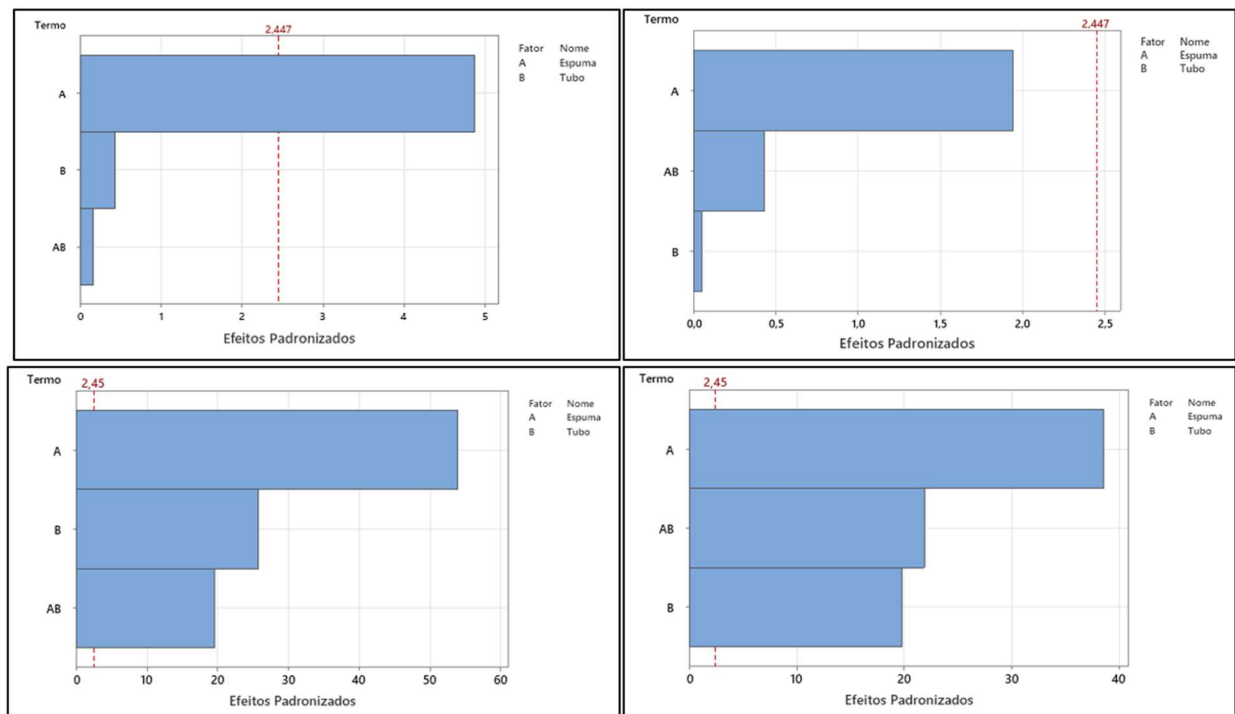


Figura 14. Gráfico de Pareto TL global (A), baixas freq. (B), médias freq. (C) e altas freq. (D)
Fonte: Os autores.

Para a resposta em altas frequências (TL alta), o gráfico de Pareto (Figura 6D) mostrou que todos os efeitos foram estatisticamente significativos ao nível de 95%. O fator Espuma (A) apresentou a maior magnitude (~39), seguido pela interação AB (~22) e pelo fator Tubo (B) (~20). Esses resultados evidenciam que, nas faixas de frequência mais elevadas, o desempenho acústico não depende apenas da espuma, mas também da presença do tubo e de sua interação com o material poroso, configurando um comportamento combinado que difere substancialmente das respostas observadas em baixas frequências.

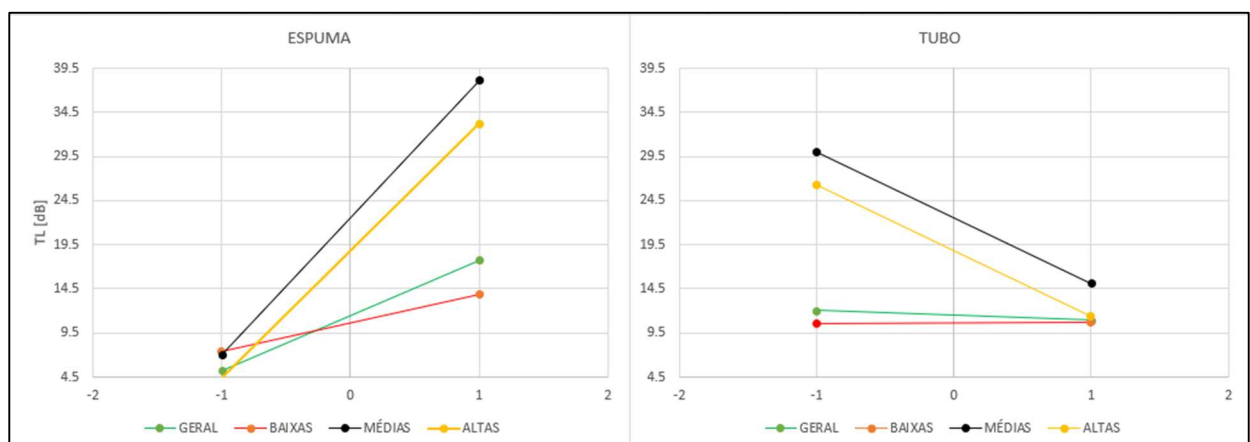


Figura 15. Gráfico de efeitos principais

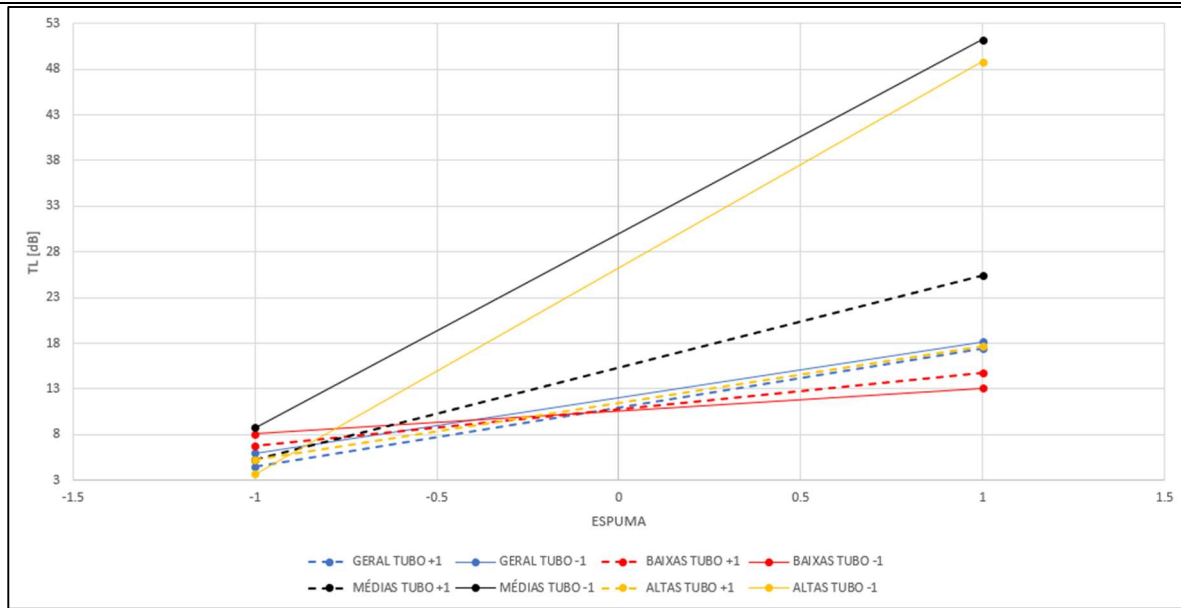


Figura 16. Gráfico de interação

A análise dos efeitos principais (Figura 7) demonstrou que a presença de espuma promoveu um aumento expressivo da resposta TL, elevando a média de aproximadamente 5 (ausência) para 18 (presença), caracterizando um efeito estatisticamente significativo. Em contraste, o fator tubo resultou em uma ligeira redução na resposta, porém, sem relevância estatística. O gráfico de interação (Figura 8) evidencia que as linhas são aproximadamente paralelas, indicando ausência de interação significativa entre os fatores. Assim, os resultados confirmam que o desempenho acústico (TL) é fortemente dependente da presença de espuma, independentemente da condição do tubo, análise a qual vai de acordo com a equação de Regressão Eq. (2).

$$TL = 11,51 + 6,29 \cdot Espuma - 0,5 \cdot Tubo + 0,21 \cdot Espuma \cdot Tubo \quad (2)$$

Os gráficos de efeitos principais (Figura 7) mostraram que a presença de espuma elevou a média da resposta de aproximadamente 7,5 para 14, enquanto o fator tubo apresentou variação praticamente desprezível (~10,7 para ~10,9). O gráfico de interação (Figura 8) sugere uma tendência de maior incremento da espuma na presença do tubo, porém, essa diferença não se mostrou estatisticamente significativa conforme indicado pelo gráfico de Pareto, corroborando com a equação de Regressão Eq. (3).

$$TL = 10,65 + 3,25 \cdot Espuma + 0,08 \cdot Tubo + 0,72 \cdot Espuma \cdot Tubo \quad (3)$$

Para a resposta TL média, os gráficos de efeitos principais (Figura 7) confirmam o efeito positivo da espuma, elevando a média de aproximadamente 7 para 39, enquanto o tubo exerceu efeito negativo, reduzindo a média de 30 para 15. O gráfico de interação (Figura 8) evidenciou que

a presença do tubo diminui o efeito benéfico da espuma, de modo que a combinação de ambos resultou em valores de TL média (~25) inferiores aos obtidos apenas com espuma (~52), indo de acordo com a Eq. (4).

$$TL = 22,573 + 15,568 \cdot Espuma - 7,448 \cdot Tubo - 5,653 \cdot Espuma \cdot Tubo \quad (4)$$

Para a resposta em altas frequências (TL alta), os gráficos de efeitos principais (Figura 7) confirmaram que a presença de espuma promoveu um incremento expressivo da resposta, elevando a média de aproximadamente 4,5 para 34. Em contraste, o tubo exerceu efeito negativo, reduzindo a média de 26 para 12. O gráfico de interação (Figura 8) evidenciou que, na presença de espuma, o desempenho máximo foi alcançado sem tubo (~49), enquanto a combinação espuma + tubo resultou em valores substancialmente menores (~17), também de acordo com a Eq. (5).

$$TL = 18,847 + 14,385 \cdot Espuma - 7,383 \cdot Tubo - 8,158 \cdot Espuma \cdot Tubo \quad (5)$$

5 CONCLUSÕES

Este estudo avaliou experimentalmente os efeitos da lã de vidro (espuma) e de um tubo perfurado no desempenho acústico de silenciadores do tipo câmara de expansão. Os resultados demonstraram que a presença da lã de vidro foi o fator determinante para o aumento da Perda de Transmissão em todas as faixas de frequência analisadas, com ganhos mais expressivos nas faixas de média e alta frequência.

O tubo perfurado apresentou um efeito negativo, reduzindo a eficiência acústica do silenciador, especialmente quando combinado com a lã de vidro. A interação entre os dois fatores mostrou-se estatisticamente significativa nas faixas de média e alta frequência, indicando que a combinação dos elementos não é vantajosa para a atenuação sonora nas configurações testadas.

Conclui-se que, para as condições experimentais adotadas, a configuração mais eficiente é a câmara de expansão com lã de vidro e sem o tubo perfurado. Estes resultados fornecem subsídios valiosos para o projeto de silenciadores híbridos, indicando a necessidade de otimização da interação entre elementos dissipativos e reativos.

REFERÊNCIAS

- ALLARD, J. F.; ATALLA, N. Propagation of sound in porous media: modelling sound absorbing materials. 2. ed. Chichester: Wiley, 2009.
- ASTM INTERNATIONAL. ASTM E2611-09: Standard test method for measurement of normal incidence sound transmission of acoustical materials based on the transfer matrix method. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2009.
- BIES, D. A.; HANSEN, C. H. Engineering noise control: theory and practice. 4. ed. Boca Raton: CRC Press, 2009.
- DELANY, M. E.; BAZLEY, E. N. Acoustical properties of fibrous absorbent materials. Applied Acoustics, v. 3, n. 2,

p. 105–116, 1970.

HERRIN, D. W.; LIU, Z. Advances in the use of micro-perforated materials for noise control. *Noise Control Engineering Journal*, v. 59, n. 1, p. 21–29, 2011.

ISO – International Organization for Standardization. ISO 10534-2: Acoustics — Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes — Part 2: Transfer-function method. Geneva: ISO, 1998.

KANG, J.; FUCHS, H. V. Predicting the absorption of open weave textiles and micro-perforated membranes backed by an air space. *Journal of Sound and Vibration*, v. 220, n. 5, p. 905–920, 1999.

LEE, D.; BOLTON, J. S.; MONGEAU, L. Hybrid passive/active mufflers using micro-perforated materials. *Applied Acoustics*, v. 113, p. 104–112, 2016.

MAA, D.-Y. Potential of microperforated panel absorber. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 104, n. 5, p. 2861–2866, 1998.

MONTEIRO, Wanderson Vinicius de Oliveira. Avaliação do desempenho de silenciadores reativos e dissipativos por meio de variações paramétricas. 2022. 63 f.— Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2022.

MUNJAL, M. L. *Acoustics of ducts and mufflers*. New York: Wiley, 1987.

MUNJAL, M. L. *Acoustics of ducts and mufflers: with application to exhaust and ventilation system design*. 2. ed. New York: Wiley, 2014.

SULLIVAN, J. W. A method for modeling perforated tube muffler components. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 50, n. 6B, p. 1586–1592, 1971.

YANG, M.; SHENG, P. Sound absorption structures: from porous media to acoustic metamaterials. *Annual Review of Materials Research*, v. 47, p. 83–114, 2017.



V CONGRESSO 20
PPGMEC 25

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS OPERACIONAIS NA GEOMETRIA DE CORDÕES DE SOLDA GMAW COM INCONEL 625

¹ Elias A. Teixeira, ¹ Lucas Henrique C. Calixto, ¹ Maria Helena R. Moreno, ¹ Thiago A. Flores, ¹ Demostenes Ferreira Filho

¹ University of Goiás - UFG

Alameda Ingá - California Farms, 74045-155, Goiânia / Goiás, Brazil

demostenesferreira@ufg.br, elias.teixeira@discente.ufg.br, lucashenrique3034@discente.ufg.br, moreno2@discente.ufg.br, thiago.flores@discente.ufg.br

DOI: 10.5281/zenodo.19041622

Resumo. O avanço das tecnologias de soldagem tem impulsionado estudos voltados ao controle térmico e à qualidade geométrica dos cordões, aspectos essenciais para aplicações em manufatura aditiva por deposição a arco (MADA). Este estudo avaliou os efeitos de parâmetros operacionais no GMAW (*Gas Metal Arc Welding*), focando nos modos CMT (*Cold Metal Transfer*, técnica de transferência metálica de baixo aporte térmico) e pulsado, para deposição de cordões *Bead-on-Plate* (técnica em que cordões são depositados sobre uma chapa sem função estrutural, usada para estudo de parâmetros) em aço SAE 1010 com arame sólido Inconel 625. O delineamento fatorial $3 \times 3 \times 2$ (três correntes, três gases e dois modos) resultou em 54 cordões, analisados quanto à geometria e temperatura superficial. A análise estatística indicou que a configuração com gás Argônio, corrente elétrica de 180 A e modo CMT apresentou a maior desejabilidade composta ($D = 0,7011$), demonstrando o melhor equilíbrio entre penetração, diluição e controle térmico e geométrico.

Palavras-chave: WAAM, GMAW, CMT, Inconel-625, *Bead-on-Plate*.

1 INTRODUÇÃO

O avanço das tecnologias de manufatura metálica tem impulsionado processos de deposição controlada, priorizando eficiência térmica, qualidade geométrica e estabilidade do arco. Entre eles, os processos de soldagem por arco se destacam pela robustez, viabilidade econômica e possibilidade de automação, sendo usados em aplicações industriais e pesquisas experimentais. A técnica *Bead-on-Plate*, que deposita cordões sobre chapas sem função estrutural, é útil para estudar o efeito de variáveis de processo sobre a geometria da solda (KOU, 2003).

A qualidade do cordão é avaliada por largura, altura do reforço, profundidade de penetração e diluição, que influenciam a integridade e o desempenho final. Embora normas como AWS D1.1 (2010) e ASME Seção IX (2010) abordem descontinuidades, não há referências específicas para cordões singelos, exigindo métodos estatísticos e de otimização, como planejamento fatorial e análise de desejabilidade, para selecionar as melhores condições operacionais (MONTGOMERY, 2013).

A análise de desejabilidade é uma técnica estatística utilizada para otimizar múltiplas respostas simultaneamente. Cada variável de interesse é transformada em uma função de desejabilidade individual, variando de 0 (resultado totalmente indesejado) a 1 (resultado ideal). Em seguida, essas funções são combinadas em uma desejabilidade composta, permitindo avaliar a qualidade global de uma combinação de parâmetros. Dessa forma, o método possibilita identificar o conjunto de condições operacionais que melhor satisfaz, ao mesmo tempo, todos os critérios de desempenho estabelecidos no estudo.

Este trabalho visa avaliar a influência de corrente elétrica, composição do gás de proteção e modos de transferência metálica na geometria de cordões *Bead-on-Plate* em aço SAE 1010, utilizando arame Inconel 625 de 1,2 mm de diâmetro, contribuindo para a definição de parâmetros que otimizem a qualidade geométrica em manufatura aditiva e reparos industriais.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Manufatura aditiva de metais

A manufatura aditiva (AM), ou impressão 3D, produz estruturas complexas a partir de modelos tridimensionais por deposição sucessiva de camadas. Criada por Charles Hull em 1986 com a estereolitografia (SLA), evoluiu com técnicas como fusão em leito de pó, FDM e impressão por jato de tinta, consolidando-se em áreas como construção civil, prototipagem e biomecânica (NGO et al., 2018). Na manufatura aditiva de metais (MAM), destaca-se a Manufatura Aditiva por

Deposição a Arco (MADA), reconhecida por alta taxa de deposição, menor custo e baixo desperdício de material. Trata-se de uma técnica DED (*Directed Energy Deposition*, processo de manufatura aditiva em que material é depositado e fundido simultaneamente por fonte de energia concentrada) que utiliza arame metálico fundido por arco elétrico, permitindo construção em camadas e redução de custos em comparação a processos baseados em pó ou laser. Contudo, o elevado aporte térmico pode comprometer a qualidade e limitar materiais processáveis (CUNNINGHAM et al., 2018).

A MADA emprega processos como GTAW, PAW (*Plasma Arc Welding*, processo de soldagem por arco plasma) e principalmente GMAW, que se destaca por alta taxa de deposição (até 7,8 kg/h), bom aproveitamento do material e simplicidade operacional, podendo operar em MIG (gases inertes) ou MAG (gases ativos) (SHAH et al., 2023).

Apesar da eficiência do GMAW convencional, seu alto aporte térmico pode gerar grãos grosseiros, tensões residuais e trincas. Para mitigar isso, aplicam-se variações como GMAW pulsado e CMT. O modo pulsado alterna correntes de pico e base, permitindo transferência controlada, menor respingo e melhor controle térmico (SHAH et al., 2023). O CMT sincroniza a alimentação do arame com o arco via servomotor, retraindo-o durante o curto-circuito, reduzindo aporte térmico e respingos, garantindo deposições precisas, especialmente no Inconel 625 (SHANKER & WATTAL, 2023). Parâmetros como velocidade do arame, corrente, deslocamento e tipo de gás influenciam a geometria e a qualidade metalúrgica, e a obtenção de camadas consistentes ainda é desafiadora, sobretudo em sistemas robotizados (NOVELINO et al., 2022). Estudos sobre os efeitos térmicos do CMT e do modo pulsado são ainda limitados, exigindo pesquisas adicionais para otimização em superligas (POZNYAKOV et al., 2018).

2.2 Inconel 625

O Inconel 625 é uma superliga à base de níquel, não magnética e reforçada por solução sólida, reconhecida por sua alta resistência mecânica, estabilidade térmica (até 1093 °C) e excelente desempenho em ambientes agressivos. Suas propriedades derivam da combinação de níquel, cromo, molibdênio e nióbio: o níquel e o cromo conferem resistência à oxidação, enquanto o molibdênio e o nióbio aumentam a resistência à corrosão e estabilizam a microestrutura. Essa composição garante proteção contra corrosão por pite, frestas e tensões induzidas por cloretos, além de boa performance em altas temperaturas. Por isso, a liga é amplamente usada nos setores aeroespacial, químico, nuclear e marítimo (PAUL et al., 2007; SHANKAR et al., 2001).

Com o avanço da Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA), tornou-se possível fabricar componentes metálicos com maior eficiência e menor custo. Entre suas variantes, destaca-se o Cold Metal Transfer (CMT), que oferece altas taxas de deposição e controle térmico aprimorado. Aplicações do processo MADA-CMT ao Inconel 625 têm mostrado boas propriedades mecânicas, como energia Charpy V entre 160 e 200 J e tenacidade à fratura (CTOD) de 0,49 a 1,05 mm a -46 °C, superando resultados de técnicas baseadas em pó metálico (AKSELSEN et al., 2022). Assim, comparar diferentes variantes da MADA é essencial para compreender a influência dos parâmetros de processo na qualidade dos componentes manufaturados.

2.3 Influência dos parâmetros de processo

Estudos com GTAW-WAAM mostram que altas correntes e baixas velocidades da tocha favorecem a fusão completa entre camadas, aumentando resistência à tração (688 MPa) e dureza (270 HV) do Inconel 625, mas também elevam aporte térmico, promovendo anisotropia e microestrutura menos homogênea (PUVIYARASAN et al., 2023). O gás de proteção é determinante na qualidade da soldagem. Gases inertes, como argônio, evitam oxidação, garantem fusão entre camadas e preservam propriedades da liga. Vazões inadequadas comprometem soldabilidade, geram porosidade e descontinuidades (AKSELSEN et al., 2022; PUVIYARASAN et al., 2023). O controle da temperatura de interpasse é crítico para reduzir acúmulo de calor, evitando fases frágeis como laves e promovendo microestruturas mais finas e homogêneas. Assim, a interação entre corrente, velocidade da tocha, gás e temperatura de interpasse devem ser cuidadosamente ajustadas para otimizar propriedades mecânicas, estabilidade geométrica e uniformidade microestrutural em componentes MADA.

Entre as propriedades mecânicas desejáveis destacam-se a resistência à tração, o limite de escoamento, a dureza, a tenacidade à fratura e a resistência ao impacto (Charpy V). Essas propriedades são fundamentais para assegurar integridade estrutural, estabilidade dimensional e confiabilidade operacional em componentes fabricados por MADA, uma vez que são diretamente influenciadas pelo aporte térmico, pelo modo de transferência metálica e pela composição do gás de proteção durante o processo.

Portanto, a interação entre corrente elétrica, velocidade de avanço da tocha, gás de proteção e temperatura de interpasse, devem ser cuidadosamente ajustadas, a fim de atingir as propriedades mecânicas desejáveis, conferir estabilidade geométrica durante o processo e uniformidade microestrutural dos componentes fabricados por estes tipos de processos de manufatura aditiva.

3 METODOLOGIA

Este estudo compara os modos de transferência metálica CMT, GMAW e pulsado aplicados à fabricação por MADA com o material de deposição Inconel 625. Foram produzidas amostras variando parâmetros como corrente de soldagem e tipo de gás de proteção, com o objetivo de identificar as combinações que proporcionam melhores condições de deposição. Avaliaram-se largura do cordão, área e profundidade de fusão, além da área e altura do reforço. O planejamento experimental foi estruturado em etapas fundamentais para a condução do estudo.

3.1 Corpo de Prova e Aplicação dos Cordões

Foram utilizadas chapas de aço carbono SAE 1010 de 80×120 mm e 9,5 mm de espessura. No estado laminado a quente, apresentavam superfície limpa, sem carepas ou oxidação, atendendo à preparação recomendada pela AWS D1.1/D1.1M:2020. Cada chapa recebeu três cordões *Bead-on-Plate* de 100 mm, depositados paralelamente ao lado maior, com espaçamento suficiente para evitar sobreposição, conforme boas práticas descritas por Kou (2003) e na literatura de GMAW.

3.2 Equipamentos e Parâmetros de Processo

A soldagem foi realizada com uma fonte multiprocesso Fronius TPS/i, compatível com os modos CMT, MIG pulsado e convencional, integrada a um robô Yaskawa Motoman DX100, que garantiu precisão na velocidade, trajetória da tocha e repetibilidade.

O consumível utilizado foi o arame sólido Inconel 625 (ERNiCrMo-3), de 1,2 mm de diâmetro, conforme a AWS A5.14. Foram mantidos os parâmetros de alimentação e o mesmo lote de arame em todas as execuções, evitando variações que pudessem comprometer a qualidade dos cordões. O experimento foi inicialmente planejado como um fatorial completo $3 \times 3 \times 3$ (corrente $\times$ gás de proteção $\times$ modo de transferência), com três réplicas por combinação (81 amostras). O modo convencional foi descartado após testes iniciais devido à instabilidade do arco e geometria irregular dos cordões (Figura 1). Segundo o datasheet do arame, a corrente mínima de estabilidade para o modo de curto-circuito era de 120 A, inferior à faixa utilizada neste estudo. Assim, o delineamento final incluiu 18 combinações (3 correntes $\times$ 3 gases $\times$ 2 modos), replicadas três vezes, totalizando 54 amostras válidas para análise.



Figura 1. Cordão de solda Convencional que não atendeu aos critérios.

Os fatores do experimento foram:

- Corrente de Soldagem (A): 140 A, 160 A, 180 A
- Gás de Proteção (vazão de 12 L/min): G1: 15% CO₂, G2: 25% He e G3: Argônio puro
- Modos de Transferência: CMT e Pulsado

Após a deposição de cada cordão, a temperatura superficial da chapa foi medida com pirômetro infravermelho Homis H811-452, na extremidade do cordão. As medições seguiram um protocolo padronizado de distância, ângulo e tempo, sendo utilizadas como variável de resposta térmica no modelo estatístico.

3.3 Preparo e Análise Metalográfica

Após a soldagem, os corpos de prova foram seccionados transversalmente em três partes com serra metalográfica refrigerada, preservando a integridade dos cordões. Uma seção de cada réplica foi utilizada para análise dimensional. As imagens das seções foram obtidas com microscópio digital ZEISS Discovery V8 SteREO, com escala de referência de 2 mm embutida, permitindo calibração precisa para extração das medidas. A análise quantitativa foi realizada no software ImageJ, onde se mediram os parâmetros geométricos diretamente a partir das imagens, conforme ilustrado na Figura 2.

1. Área de Penetração (mm²)
2. Área do Reforço (mm²)
3. Largura do Cordão (mm)
4. Profundidade da Penetração (mm)
5. Altura do Reforço (mm)

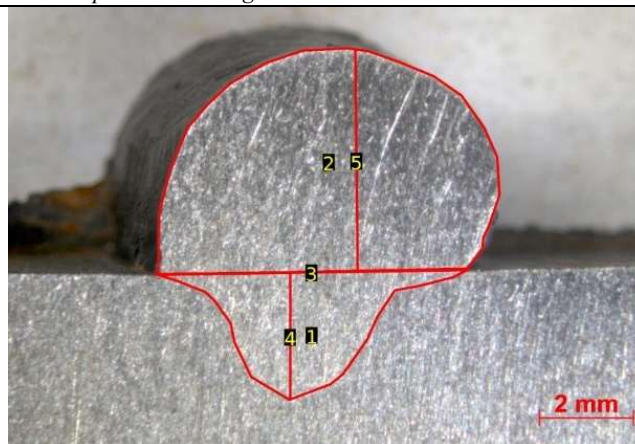


Figura 2. Cordão de solda com a indicação dos parâmetros.

Com base nesses dados, foi calculado o valor de diluição (%) para cada cordão, utilizando a seguinte Eq. 1:

$$Diluição = \frac{\text{Área de Penetração}}{\text{Área da Penetração} + \text{Área do Reforço}} \quad (1)$$

Todos os resultados coletados, incluindo as variáveis geométricas e a temperatura superficial medida, foram organizados em uma planilha compilada, apresentada como Tab. 1 neste trabalho.

Tabela 1. Resultados Coletados

Gás	Corrente	Modo de Transferência	Profundidade de Penetração (mm)	Largura do Cordão (mm)	Altura do Reforço (mm)	Diluição	Temp. (°C)
15%Co2	140A	CMT	2,669	6,547	4,707	0,218	201
15%Co2	140A	Pulsado	1,945	10,934	3,601	0,232	281
15%Co2	160A	CMT	3,183	7,249	5,017	0,223	289
15%Co2	160A	Pulsado	2,335	11,518	3,471	0,274	336
15%Co2	180A	CMT	3,152	7,904	5,353	0,212	381
15%Co2	180A	Pulsado	2,602	13,046	3,498	0,282	385
25%He	140A	CMT	0,304	6,868	5,287	0,025	158
25%He	140A	Pulsado	0,823	8,902	3,763	0,104	186
25%He	160A	CMT	0,304	6,868	5,287	0,025	198

25%He	160A	Pulsado	2,094	10,906	3,669	0,195	205
25%He	180A	CMT	0,564	7,495	5,323	0,040	193
25%He	180A	Pulsado	1,166	11,987	4,116	0,106	220
Ar	140A	CMT	0,172	4,823	5,767	0,017	112
Ar	140A	Pulsado	0,333	6,767	5,699	0,020	249
Ar	160A	CMT	1,767	12,661	2,851	0,241	158
Ar	160A	Pulsado	0,171	5,603	5,736	0,011	244
Ar	180A	CMT	1,769	10,993	3,602	0,260	179
Ar	180A	Pulsado	2,199	10,048	4,299	0,167	195
15%Co2	140A	CMT	2,685	6,500	4,791	0,229	201
15%Co2	140A	Pulsado	1,800	10,519	3,539	0,241	281
15%Co2	160A	CMT	2,719	5,702	5,453	0,179	289
15%Co2	160A	Pulsado	2,012	12,710	3,352	0,247	336
15%Co2	180A	CMT	3,368	8,326	5,086	0,236	381
15%Co2	180A	Pulsado	2,573	13,391	3,715	0,284	385
25%He	140A	CMT	0,094	5,376	5,387	0,009	158
25%He	140A	Pulsado	1,377	9,987	3,948	0,145	186
25%He	160A	CMT	0,188	6,560	5,375	0,016	198
25%He	160A	Pulsado	1,697	11,057	3,896	0,172	205
25%He	180A	CMT	0,597	7,776	5,370	0,042	193
25%He	180A	Pulsado	1,050	11,184	3,799	0,111	220
Ar	140A	CMT	0,166	4,946	5,785	0,009	112
Ar	140A	Pulsado	0,500	6,250	5,933	0,031	249
Ar	160A	CMT	1,916	0,000	2,783	0,018	158
Ar	160A	Pulsado	0,381	5,024	5,868	0,032	244
Ar	180A	CMT	1,700	11,081	3,819	0,189	179
Ar	180A	Pulsado	2,167	10,654	4,101	0,178	195
15%Co2	140A	CMT	2,735	6,912	4,642	0,233	201
15%Co2	140A	Pulsado	1,980	13,075	4,144	0,229	281
15%Co2	160A	CMT	3,171	5,983	5,338	0,217	289
15%Co2	160A	Pulsado	2,518	12,524	3,302	0,290	336

15%Co2	180A	CMT	3,152	9,094	5,690	0,199	381
15%Co2	180A	Pulsado	2,222	13,492	3,715	0,256	385
25%He	140A	CMT	0,116	5,127	5,227	0,007	158
25%He	140A	Pulsado	0,481	9,631	3,978	0,074	186
25%He	160A	CMT	0,232	6,034	5,403	0,015	198
25%He	160A	Pulsado	1,724	10,906	3,597	0,206	205
25%He	180A	CMT	0,564	7,476	5,420	0,045	193
25%He	180A	Pulsado	0,917	11,281	3,885	0,082	220
Ar	140A	CMT	0,101	5,536	5,587	0,010	112
Ar	140A	Pulsado	0,350	6,715	5,850	0,022	249
Ar	160A	CMT	1,468	11,589	3,350	0,183	158
Ar	160A	Pulsado	0,166	5,404	5,834	0,016	244
Ar	180A	CMT	1,900	10,398	3,733	0,257	179
Ar	180A	Pulsado	1,983	9,710	4,366	0,135	195

4 ANÁLISE

4.1 Análise Estatística

A análise estatística foi realizada no Minitab 22, com base em um delineamento fatorial completo $3 \times 3 \times 2$ (três gases, três níveis de corrente e dois modos de transferência), totalizando 54 amostras com três réplicas por condição (Tabela 01). Para otimizar múltiplas respostas simultaneamente, utilizou-se a função de desejabilidade composta (*desirability function approach*), técnica consagrada na engenharia para seleção de parâmetros ótimos. As metas definidas foram:

- **Temperatura:** minimizar, reduzindo aporte térmico, distorções, tensões residuais e consumo energético;
- **Diluição:** maximizar, garantindo maior fusão e ligação metalúrgica.
- **Altura do reforço:** minimizar, melhorando acabamento.
- **Largura do cordão:** alvo de 10 mm, com tolerância técnica, garantindo regularidade e compatibilidade entre cordões;
- **Profundidade de penetração:** maximizar, melhorando a ancoragem efetiva e resistência mecânica.

As funções de desejabilidade individuais foram combinadas em uma função composta, permitindo determinar a combinação ótima de parâmetros que atende simultaneamente aos critérios de desempenho e qualidade. O modelo ainda forneceu intervalos de predição a 95%, assegurando base estatística robusta para decisões técnicas.

4.2 Análise da Influência dos Parâmetros Operacionais

A análise estatística por regressão fatorial geral avaliou os efeitos de corrente, gás de proteção e modo de transferência sobre a geometria dos cordões: profundidade de penetração, altura de reforço e diluição. A Profundidade de penetração foi significativamente influenciada pelo gás de proteção (60,28%) e pela corrente (11,29%). O modo de transferência isolado teve efeito irrelevante (0,05%), mas interações gás $\times$ modo (12,13%) e triplas (7,04%) foram significativas ($p < 0,05$). CO₂ 15% geraram maiores penetrações, especialmente com 180 A, enquanto 25% He e Ar puro resultaram em penetrações menores, o Modelo R² ajustado foi = 96,92%. A Largura do cordão teve o modo de transferência como o fator mais relevante (24,30%), com o pulsado produzindo cordões mais largos que o CMT. Corrente (16,35%) e interação gás $\times$ modo (18,99%) também foram importantes. Cordões mais largos ocorreram com CO₂, modo pulsado e correntes altas. o Modelo R² ajustado foi = 64,52%. Já a Altura do reforço foi fortemente impactada pelas interações, principalmente gás $\times$ modo (45,70%) e interações triplas (13,12%). Entre efeitos principais, o modo de transferência (11,15%) foi significativo, com CMT produzindo maiores alturas devido ao menor aporte térmico. Maiores alturas ocorreram com gases inertes e correntes baixas (140 A); CO₂ e correntes altas geraram reforços mais achatados. o Modelo R² ajustado foi = 96,74%. Por fim a Diluição se mostrou sensível ao gás (51,59%) e às interações (25,55%). CO₂ elevou a diluição, especialmente no modo pulsado e correntes altas; Ar puro resultou em menor diluição. Corrente teve efeito direto (8,09%). o Modelo R² ajustado foi = 92,56%.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com base no modelo estatístico ajustado, foi possível identificar a combinação ótima de parâmetros de soldagem que maximiza a performance do cordão em termos metalúrgicos, geométricos e térmicos. A função de desejabilidade composta atingiu seu valor máximo, conforme a Tab. 2, com a seguinte condição operacional:

- Modo de Transferência: CMT (Cold Metal Transfer)
- Corrente de Soldagem: 180 A
- Gás de Proteção: Argônio puro (Ar)

Tabela 2. Desejabilidade Composta

Solução	Profundidade de Penetração Ajuste	Desejabilidade Composta
1	1,78967	0,701172

Essa configuração apresentou o melhor equilíbrio entre as cinco variáveis de resposta consideradas no estudo. Os valores preditos pelo modelo para esta combinação estão apresentados na Tab. 3:

Tabela 3. Configuração com melhor equilíbrio

Variável de Resposta	Valor Preditivo	Intervalo de Predição (95%)
Temperatura (°C)	179	179,0 – 179,0
Diluição (%)	23,54	15,85 – 31,22
Altura do Reforço (mm)	3,7180	3,3211 – 4,11
Largura do Cordão (mm)	10,82	6,73 – 14,92
Profundidade de Penetração (mm)	1,79	1,36 – 2,21

A Figura 3 mostra o gráfico de desejabilidade composta, indicando visualmente a região em que os fatores atingem simultaneamente os objetivos. A combinação ótima de parâmetros é destacada pelas linhas vermelhas verticais.

Os resultados destacam a superioridade do CMT, especialmente no controle térmico e na estabilidade do arco. A profundidade de penetração e a diluição obtidas indicam viabilidade técnica, com cordões regulares e sem excesso de reforço. O gás argônio puro favoreceu a estabilidade do arco e a formação de cordões com contorno bem definido e penetração uniforme, sem os efeitos de gases oxidantes ou altamente energéticos como CO₂ ou He.

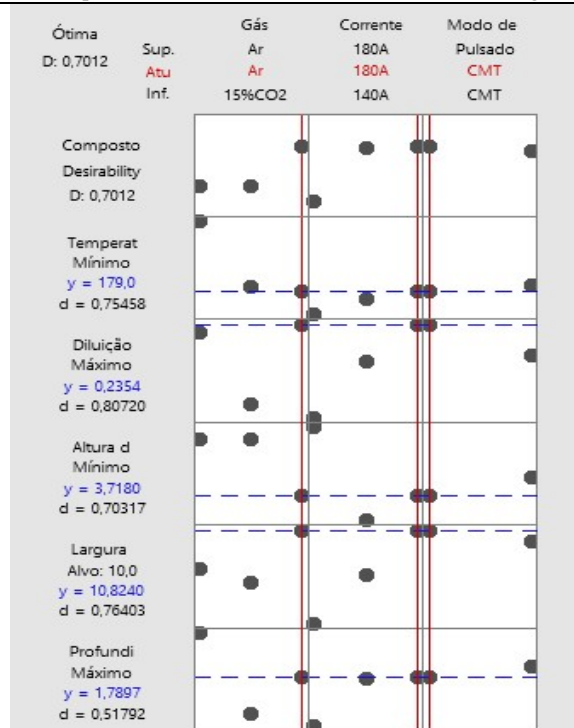


Figura 3. Gráfico de desejabilidade composta para as variáveis de resposta: temperatura, diluição, altura do reforço, largura do cordão e profundidade de penetração.

6 CONCLUSÕES

Este estudo avaliou o processo de soldagem MIG/MAG sobre aço SAE 1010 utilizando o método *Bead-on-Plate*, com foco na otimização de cinco variáveis de resposta críticas. A análise estatística identificou que a combinação com gás Argônio, com corrente elétrica de 180 A e modo de transferência CMT, apresentou a maior desejabilidade composta ($D = 0,7011$), indicando o melhor equilíbrio entre penetração, diluição e controle térmico e geométrico.

A definição das metas considerou critérios técnicos como integridade metalúrgica, acabamento superficial, estabilidade geométrica e térmica. Os resultados reforçam a eficácia do modo de transferência CMT na soldagem de aços de baixa liga, fornecendo subsídios práticos para aplicação industrial com maior controle e repetibilidade.

REFERÊNCIAS

- AKSELSSEN, Odd M. e colab. Microstructure and Properties of Wire Arc Additive Manufacturing of Inconel 625. *Metals*, v. 12, n. 11, 1 Nov 2022.
- AMERICAN WELDING SOCIETY (AWS). AWS D1.1/D1.1M: Structural Welding Code – Steel. Miami: AWS, 2010.
- AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS (ASME). ASME Boiler and Pressure Vessel Code – Section IX: Welding, Brazing and Fusing Qualifications. 2010.

AMERICAN WELDING SOCIETY (AWS). AWS A5.14: Specification for Nickel and Nickel-Alloy Bare Welding Electrodes and Rods. Miami: AWS, 2018.

CUNNINGHAM, C. R. e colab. Invited review article: Strategies and processes for high quality wire arc additive manufacturing. *Additive Manufacturing*. [S.l.]: Elsevier B.V. , 1 Ago 2018

KOU, S. *Welding Metallurgy*. 2. ed. Hoboken: Wiley-Interscience, 2003.

NGO, Tuan D. e colab. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*. [S.l.]: Elsevier Ltd. , 15 Jun 2018

NOVELINO, A. L.B. e CARVALHO, G. C. e ZIBEROV, M. Influence of WAAM-CMT deposition parameters on wall geometry. *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*, v. 5, 1 Nov 2022.

PAUL, C. P. e colab. Investigating laser rapid manufacturing for Inconel-625 components. *Optics and Laser Technology*, v. 39, n. 4, p. 800–805, Jun 2007.

POZNYAKOV, V.D. e colab. Effect of pulsed-arc welding modes on the change of weld metal and haz parameters of welded joints produced with Sv-08kh20N9G7T wire. *The Paton Welding Journal*, v. 2018, n. 9, p. 7–12, 28 Set 2018. Disponível em: <<http://patonpublishinghouse.com/eng/journals/tpwj/2018/09/02/>>.

PUVIYARASAN, M. e colab. Influence of GTAW parameters on the mechanical properties and microstructure of wire arc additive manufactured Inconel 625. 1 Jan 2023, [S.l.]: Elsevier Ltd, 1 Jan 2023. p. 2528–2533.

SHAH, Abid e colab. A Review of the Recent Developments and Challenges in Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) Process. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. [S.l.]: MDPI. , 1 Jun 2023

SHANKAR, Vani e colab. Letter to the Editors Microstructure and mechanical properties of Inconel 625 superalloy. . [S.l: s.n.], 2001. Disponível em: <www.elsevier.nl/locate/jnucmat>.

SHANKER, Hari e WATTAL, Reeta. A comprehensive survey on the cold metal transfer process for additive manufacturing. 2023, [S.l.]: Institute of Physics, 2023.



CONSTRUÇÃO DE UM DISPOSITIVO JOMINY DE BAIXO CUSTO PARA ENSAIO DE TEMPERABILIDADE EM AÇOS

¹ João P. F. S. Santos, ¹ Lucca D. O. Schmid, ¹ Maria V. R. Borges, ¹ T.S. de Souza, ¹ Fernanda C. T. D. Troysi

¹ Faculdade Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de Goiás
Estrada Municipal, Quadra e Área Lote 04, Fazenda Santo Antônio, 74971-451, Aparecida de Goiânia - Goiás, Brasil

joão_ferraz@discente.ufg.br, lucca_schmid@discente.ufg.br, maria_vitoria23@discente.ufg.br, thiago.silva23@discente.ufg.br, fernandatroyysi@ufg.br

DOI: 10.5281/zenodo.19041245

Resumo. A temperabilidade dos aços é fundamental para compreender sua resposta aos tratamentos térmicos, especialmente na formação de martensita e no desempenho mecânico final. O ensaio Jominy, padronizado pela ABNT NBR 6339:2016, permite avaliar a variação de dureza ao longo do corpo de prova a partir de diferentes taxas de resfriamento, sendo amplamente utilizado em ensino e pesquisa. Contudo, a disponibilidade de equipamentos comerciais é limitada devido ao alto custo. Neste estudo, foi desenvolvido um dispositivo Jominy de baixo custo, projetado com materiais acessíveis e modelagem 3D, capaz de reproduzir os parâmetros normativos e apresentar excelente concordância entre valores teóricos e experimentais. Além de portátil e simples de montar, o protótipo reduz em mais de 85% o custo em comparação a sistemas comerciais, tornando o ensaio mais acessível e ampliando sua aplicação em ambientes acadêmicos.

Palavras-chave: Temperabilidade. Ensaio Jominy. Tratamento térmico. Microestrutura. Ensino Experimental

1 INTRODUÇÃO

A temperabilidade é uma das propriedades mais importantes dos aços quando se trata de tratamento térmico, pois determina a velocidade de resfriamento necessária para que ocorra a transformação martensítica e, conseqüentemente, a dureza final do material (LISCIE; TENSI;

LUTY, 1991; KRAUS, 1990; THELNING, 1984; TOTTEEN; HOWES, 1997). A compreensão desse conceito é essencial na formação de engenheiros e profissionais da área de materiais, visto que influencia diretamente o desempenho mecânico de componentes metálicos utilizados em diferentes aplicações industriais, (KANDPAL et al., 2011; ZHU et al., 2025). Nesse contexto, o ensaio Jominy destaca-se como um dos métodos mais utilizados para avaliar a temperabilidade dos aços, permitindo correlacionar a microestrutura e a dureza ao longo de um corpo de prova submetido a diferentes taxas de resfriamento (NADKARNI et al., 2025).

Estudos recentes têm empregado simulações computacionais para estimar o perfil de dureza e otimizar os parâmetros de têmpera, permitindo maior controle de microestrutura e eficiência energética (SAKANDAR, 2022; SMOLJAN et al., 2019).

A importância das atividades práticas no processo de ensino-aprendizagem das ciências é amplamente reconhecida por educadores e pesquisadores, pois elas representam um elo essencial entre a teoria e a aplicação real dos conhecimentos, promovendo a construção ativa do saber e o desenvolvimento de competências investigativas e técnicas (ANDRADE; MASSABNI, 2011; BASSOLI, 2014). No entanto, apesar desse consenso, a realidade das salas de aula e laboratórios, especialmente em instituições públicas, ainda revela um cenário marcado pela escassez de práticas experimentais, muitas vezes devido à falta de infraestrutura adequada e ao alto custo de equipamentos didáticos. Nesse contexto, a criação de dispositivos de baixo custo, fundamentados em princípios científicos e parâmetros normativos, surge como uma estratégia concreta para reduzir essa lacuna e potencializar a aprendizagem.

Dessa forma, este trabalho propõe o desenvolvimento de um dispositivo que alia precisão técnica, baixo custo e facilidade de transporte, em conformidade com a norma ABNT NBR 6339:2016, com o objetivo de tornar o ensaio Jominy mais acessível e aplicável em ambientes acadêmicos e de formação profissional.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Fundamentação teórica sobre o ensaio Jominy

O ensaio Jominy é o método padronizado mais utilizado para determinar a temperabilidade dos aços, ou seja, a capacidade de uma liga ferrosa de endurecer em profundidade após o processo de têmpera (NADKARNI et al., 2025). Essa propriedade está diretamente ligada à composição química do aço e ao tamanho de grão austenítico formado durante o aquecimento. De acordo com Callister (2012) e Chiaverini (2002), elementos de liga como C, Cr, Mn, Mo e Ni influenciam

fortemente na cinética de transformação, deslocando as curvas de transformação nos diagramas TTT e promovendo maior formação de martensita em regiões internas do material.

No ensaio, o corpo de prova é aquecido até a faixa de austenitização (870–925 °C) e, em seguida, submetido a um jato de água controlado em uma das extremidades. O gradiente térmico criado ao longo do comprimento origina diferentes taxas de resfriamento, o que resulta em regiões com microestruturas distintas: martensita na extremidade resfriada, bainita intermediária e perlita ou ferrita nas regiões mais afastadas. A variação de dureza ao longo do corpo de prova, obtida pelo ensaio, é usada para determinar a curva de temperabilidade do aço, uma ferramenta fundamental para prever a profundidade de têmpera em componentes reais.

2.2 Revisão de estudos anteriores

O método foi desenvolvido por Walter E. Jominy e A. L. Boegehold em 1938, nos laboratórios da General Motors, e consolidado como padrão pela norma ASTM A255. Diversos autores, como Totten et al. (2006) e Chiaverini (2002), apontam o ensaio Jominy como o mais representativo para avaliar o potencial de endurecimento dos aços, permitindo correlacionar dureza, microestrutura e composição química.

No Brasil, Alves (2022) projetou e construiu um dispositivo Jominy de baixo custo, demonstrando que é possível obter resultados próximos aos de equipamentos comerciais. Seu projeto utilizou materiais simples e reutilizáveis, além de seguir rigorosamente as condições de resfriamento estabelecidas pela norma. Trabalhos como os de Feisel (2005) e Utschig (2025) também reforçam o caráter didático e a importância do ensaio na formação de engenheiros, pela possibilidade de relacionar o comportamento prático com o teórico.

2.3 Parâmetros normativos e princípios de operação

A ABNT NBR 6339:2016 define o método brasileiro para o ensaio Jominy, equivalente à norma ASTM A255, e estabelece as dimensões e condições necessárias para reprodutibilidade dos resultados. O corpo de prova convencional deve possuir 32 mm de diâmetro total, 101 mm de comprimento e flange de 3 mm de espessura. O ensaio utiliza jato de água com $12,5 \pm 0,1$ mm de diâmetro, cuja saída está posicionada 12,5 mm abaixo da extremidade do corpo de prova. A Figura 1 ilustra o esquema do dispositivo conforme a norma, destacando a posição do jato, a coluna d'água e o suporte de fixação.

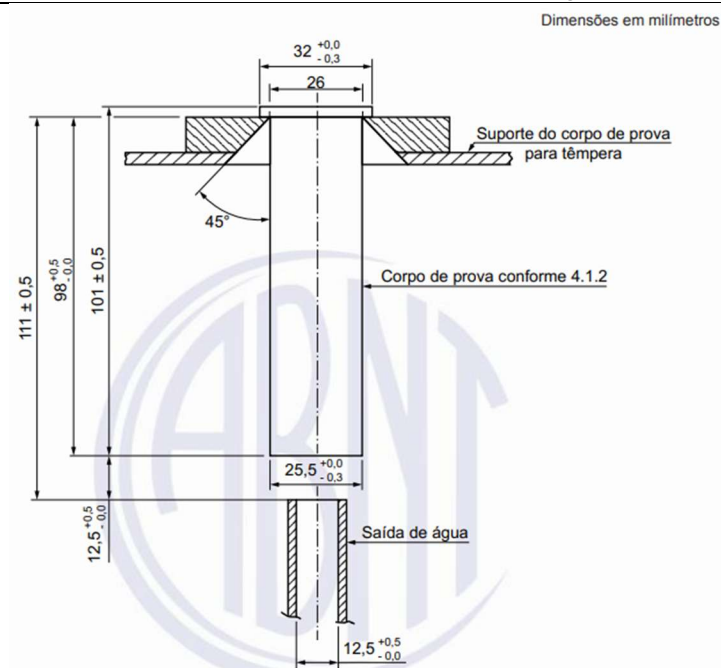


Figura 1. Esquema do dispositivo Jominy (ABNT NBR 6339, 2016)

A Figura 1 resume os principais parâmetros de resfriamento descritos na norma, relacionando o diâmetro do corpo de prova com o orifício de saída de água e a altura livre da coluna. Esses dados servem de base para o dimensionamento do jato e para o cálculo da vazão teórica adotada no projeto.

Tabela 1. Parâmetros de resfriamento para corpos de prova (ABNT NBR 6339, 2016)

Diâmetro do corpo de prova (mm)	Orifício de saída de água (mm)	Altura livre da coluna de d'água (mm)
25,5	12,5	65 ± 10
19,0	12,5	65 ± 10
12,7	6,4	$102 \pm 10/20$
6,4	3,2	$203 \pm 10/40$

No presente trabalho, serão considerados apenas os corpos de prova de diâmetro 25,5 mm, que corresponde à dimensão mais comum para aplicações didáticas e experimentais. Essa amostra permite utilizar o conjunto de parâmetros hidráulicos definidos pela norma, orifício de 12,5 mm e coluna d'água de 65 ± 10 mm, simplificando a montagem do dispositivo e garantindo a comparabilidade dos resultados com a literatura técnica. Esses valores asseguram a constância do fluxo de resfriamento e a reprodutibilidade entre ensaios, sendo referência fundamental para o desenvolvimento de dispositivos acadêmicos e laboratoriais.

Considerações teóricas de projeto e dimensionamento

Com base nos parâmetros apresentados, a vazão teórica do jato foi calculada segundo o princípio de Bernoulli. A velocidade de saída da água é dada pela eq. (1):

$$v = \sqrt{2gh} \quad (1)$$

Onde $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ é a aceleração da gravidade e $h = 0,065 \text{ m}$ a altura da coluna d'água. Assim $v \approx 1,13 \text{ m/s}$. Com o diâmetro do orifício de $12,5 \text{ mm}$, a área de saída é dada pela eq. (2).

$$A = \frac{\pi d^2}{4} \quad (2)$$

O que vai resultar em um $A = 1,23 \times 10^{-4} \text{ m}^2$, logo, foi possível deduzir o valor da vazão teórica, conforme demonstrado na eq. (3):

$$Q_{\text{teórico}} = A \times v \quad (3)$$

Temos então que $Q_{\text{teórico}} = 1,39 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \text{ s}$, equivalente a aproximadamente $0,14 \text{ L/s}$ ($8,4 \text{ L/min}$). Esse valor coincide com o intervalo experimental observado por Alves (2022), que reportou fluxos entre 8 e 10 L/min . Logo, para o desenvolvimento do dispositivo proposto, recomenda-se o uso de sistema de abastecimento hidráulico estável, que pode ser obtido tanto por coluna gravitacional ajustável quanto por bomba de recirculação, garantindo regime laminar e jato contínuo.

3 METODOLOGIA

O projeto foi desenvolvido com base nos requisitos da ABNT NBR 6339:2016, que estabelece as especificações dimensionais e operacionais do ensaio Jominy. A adoção dessa norma assegura a reprodutibilidade e a confiabilidade do experimento, reforçando a importância do uso de normas no processo de formação de engenheiros.

A concepção do dispositivo foi realizada em ambiente de modelagem 3D (Fusion 360), o que permitiu a validação do arranjo geométrico e a visualização detalhada dos componentes antes da construção física. A Figura 2 apresenta os modelos renderizados do protótipo, destacando sua estrutura externa e seu arranjo interno.

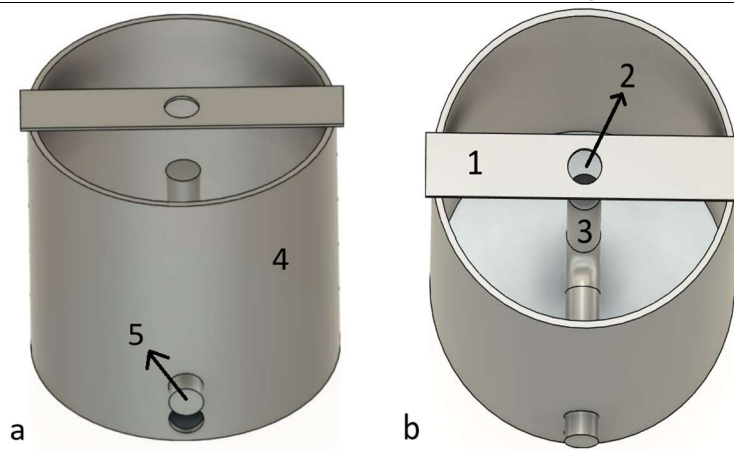


Figura 2. Modelo 3D (vista superior interna) com os componentes principais do dispositivo Jominy proposto. (1) Suporte do corpo de prova; (2) orifício para encaixe do corpo de prova; (3) tubo de subida do jato (saída de água); (4) reservatório principal; (5) conexão de entrada de água.

Seguindo o ilustrado na Figura 2(a), o dispositivo consiste em um reservatório cilíndrico que serve como estrutura principal e uma barra de suporte superior, projetada para fixar o corpo de prova na posição correta. A vista interna (Figura 2(b)) detalha o componente-chave do sistema: o tubo vertical que direciona o jato de água (3). Este tubo é posicionado de forma a garantir que o fluxo de resfriamento atinja a extremidade inferior do corpo de prova de maneira centralizada e constante, mantendo a distância padronizada de 12,5 mm, conforme especificado pela norma ABNT NBR 6339:2016.

Na concepção do dispositivo, priorizou-se o uso de materiais acessíveis e de baixo custo, sem comprometer a segurança e a funcionalidade. Os componentes previstos para a montagem, visualizados no modelo estão presentes na Tab. 2.

Tabela 2. Valores dos materiais comprados

Materiais	Custo
Chapa de aço inoxidável	R\$ 120,00
Registro esfera em PVC, 25 mm	R\$ 5,00
2 adaptadores, 25mm (3/4)	R\$ 10,00
Cola para tubos e conexões	R\$ 5,00
Joelho 90° PVC, 3/4" (25mm)	R\$ 2,00
Tubo PVC 25mm	R\$ 5,00
Adaptador flange com anel em PVC marrom	R\$ 14,90
Total	R\$ 161,90

Alguns componentes, como o vasilhame de alumínio, as duas porcas e parafusos M6 em aço inoxidável e a mangueira de máquina de lavar (1,40 m), já estavam disponíveis no laboratório e, portanto, não foram incluídos na lista de materiais adquiridos especificamente para o projeto.

A montagem do protótipo foi realizada em dois dias. No primeiro dia, foram efetuadas as compras dos materiais complementares, a perfuração para instalação da entrada do sistema hidráulico e a colagem dos componentes estruturais. No segundo dia, foram realizados os cálculos de vazão do sistema, seguidos dos ajustes finais e validação preliminar do dispositivo.

O sistema hidráulico foi integrado diretamente ao reservatório, permitindo controlar com precisão o fluxo e a pressão da água durante o ensaio. Esse processo de construção reforça o caráter didático do projeto, pois permite aos estudantes aplicar conceitos normativos e fundamentos teóricos de temperabilidade na prática experimental.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a conclusão da montagem do dispositivo Jominy proposto, verificou-se que o sistema atendeu satisfatoriamente aos parâmetros dimensionais da ABNT NBR 6339:2016, apresentando funcionamento estável e jato de água uniforme. O dispositivo foi montado utilizando os materiais acessíveis listados na metodologia. A Figura 3 apresenta o protótipo finalizado e seus componentes principais, destacando a simplicidade do design.



Figura 3. Dispositivo Jominy de baixo custo desenvolvido

Uma característica validada pela construção é a portabilidade do equipamento. O uso de um vasilhame de alumínio como reservatório e conexões majoritariamente em PVC resulta em um conjunto leve e de fácil transporte. Como demonstrado na Figura 4, todos os componentes podem ser acondicionados dentro do próprio reservatório, facilitando o armazenamento e o deslocamento entre diferentes laboratórios ou bancadas.



Figura 4. Portabilidade do dispositivo, com os componentes acondicionados no reservatório

O teste de vazão foi realizado para validar o regime de escoamento estabelecido na norma, que recomenda orifício de 12,5 mm e altura livre da coluna d'água de (65 ± 10) mm para corpos de prova de 25,5 mm de diâmetro. O cálculo teórico da vazão, com base na equação de Bernoulli ($v = \sqrt{2gh}$), resultou em $Q_{teórica} = 0,139 \frac{L}{s} \left(8,4 \frac{L}{min} \right)$.

Experimentalmente, o valor obtido foi $Q_{experimental} = 0,1395 \frac{L}{s} \left(\approx 8,37 \frac{L}{min} \right)$ demonstrando excelente concordância ($< 1\%$ de diferença) com o valor teórico e validando o desempenho hidráulico do sistema. Essa consistência confirma que o jato d'água apresenta fluxo contínuo e uniforme, condição essencial para a reprodutibilidade do ensaio Jominy.

Entretanto, observou-se que a altura real da coluna de água em regime de corpo livre foi de aproximadamente 35 mm, inferior ao valor nominal de 65 mm previsto pela norma. Essa discrepância é atribuída ao diâmetro interno do tubo e à pressão de entrada reduzida do sistema

gravitacional. Apesar disso, o impacto sobre a vazão foi mínimo, indicando que o dispositivo mantém desempenho adequado mesmo sob variação moderada da coluna d'água.

Em aplicações futuras, recomenda-se a utilização de um reservatório com altura ajustável ou uma válvula reguladora de pressão para adequar o valor ao intervalo normativo.

Além da conformidade técnica, destaca-se a viabilidade econômica do equipamento. Enquanto dispositivos comerciais para ensaio Jominy podem ultrapassar valores de R\$ 1.200,00, o protótipo desenvolvido apresentou custo total de R\$ 161,90, o que representa redução superior a 85%. Essa economia torna o equipamento uma alternativa acessível para instituições de ensino e laboratórios acadêmicos, favorecendo a prática experimental em disciplinas de Tratamentos Térmicos e Materiais Metálicos.

Por fim, a execução dos testes confirmou a facilidade de montagem, operação e transporte, reforçando o caráter móvel do dispositivo. A robustez estrutural, associada ao sistema de fixação do corpo de prova e ao controle de fluxo, garante estabilidade durante o ensaio, permitindo sua utilização em diferentes bancadas sem necessidade de instalação fixa.

5 CONCLUSÕES

O desenvolvimento e construção do dispositivo Jominy de baixo custo mostraram-se tecnicamente viáveis e alinhados aos requisitos da ABNT NBR 6339:2016. O equipamento apresentou vazão real compatível com o valor teórico e com dispositivos normatizados, validando o desempenho hidráulico do sistema.

Mesmo com altura da coluna d'água ligeiramente inferior à referência, a estabilidade do jato e o fluxo contínuo asseguraram condições adequadas de resfriamento para ensaios de temperabilidade em aços.

O protótipo proposto se destaca pela portabilidade, facilidade de montagem e baixo custo, possibilitando sua utilização em atividades acadêmicas e projetos de extensão sem necessidade de infraestrutura complexa. A comparação econômica evidencia uma redução de custo significativa de R\$ 161,90 em relação a modelos comerciais, reforçando o potencial do equipamento como solução acessível para o ensino experimental.

Conclui-se, portanto, que o dispositivo atinge o objetivo de tornar o ensaio Jominy mais acessível, didático e reproduzível, sendo uma ferramenta eficaz tanto para o estudo da temperabilidade quanto para a disseminação do aprendizado prático em Engenharia de Materiais e Mecânica.

REFERÊNCIAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6339:2016** - Aço - Determinação da temperabilidade (ensaio Jominy). Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ALVES, Esdras. Projeto e construção de um dispositivo Jominy para ensaio de temperabilidade em aços. 2022. 43 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de São Paulo, São José dos Campos, 2022.
- ANDRADE, M. L. F.; MASSABNI, V. G. O desenvolvimento de atividades práticas na escola: um desafio para os professores de ciências. *Ciência & Educação*, Bauru, v. 17, n. 4, p. 835-854, 2011.
- AUTODESK. *Fusion 360* [software]. Disponível em: <https://www.autodesk.com/products/fusion-360>.
- BASSOLI, Fernanda. Atividades práticas e o ensino-aprendizagem de ciência(s): mitos, tendências e distorções. *Ciência & Educação* (Bauru), v. 20, n. 3, p. 579-593, 2014.
- CALLISTER, W. D. *Ciência e Engenharia de Materiais*. 9ª ed. LTC, 2012.
- CHIAVERINI, V. *Tratamento Térmico dos Aços*. 8ª ed. ABM, 2002.
- FEISEL, Lyle D.; ROSA, Albert J. The role of the laboratory in undergraduate engineering education. *Journal of engineering Education*, v. 94, n. 1, p. 121-130, 2005.
- KANDPAL, Bhaskar Chandra et al. A review on Jominy test and determination of effect of alloying elements on hardenability of steel using Jominy end quench test. *International Journal of Advances in Engineering & Technology*, v. 1, n. 3, p. 65, 2011.
- KRAUS, G. *Steels heat treatment and processing principles*. ASM International, New York, 1990.
- LISCIE, B.; TENSI, H. M.; LUTY, W. *Theory and technology of quenching*. Springer-Verlag, Berlin, 1991.
- NADKARNI, Gopal et al. The relevance of the standard Jominy test for rapid/intensive quenching. In: *Heat Treating Conference*. ASM International, 2025. p. 166-173.
- SAKANDAR, Salman. Numerical simulation of steel heat treatments. 2022. Tese de Doutorado Politecnico di Torino.
- SMOLJAN, Božo et al. An application of Jominy test results in computer simulation of steel quenching. In: *Materials Science Forum*. Trans Tech Publications Ltd, 2019. p. 504-509.
- THELNING, E. K. *Steel and its Heat Treatment*. Butterworths, London, 1984.
- TOTTEN, G. E. *Steel Heat Treatment Handbook*. CRC Press, 2006.
- TOTTEN, G. E.; HOWES, M. A. H. *Steel Heat Treatment*. Marcel Dekker, New York, 1997.
- UTSCHIG, Tris; TEKES, Ayse; LINDEN, Maureen. Impact of 3D-printed laboratory equipment in vibrations and controls courses on student engineering identity, motivation, and mindset. *International Journal of Mechanical Engineering Education*, v. 53, n. 1, p. 3-28, 2025.
- ZHU, Penglong et al. Microstructure and impact toughness evolution in high-strength anchor chain steel: a Jominy test-based investigation. *Materials & Design*, p. 114113, 2025.



DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA PARA MONITORAMENTO E DETERMINAÇÃO DE VALORES DE GAP VARIÁVEIS EM PROCESSOS DE MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO (MADA)

¹ Luis Pedro S. Neto, ¹ Demostenes Ferreira Filho, ¹ Marco Antonio A. de Oliveira

¹ Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação

luisluis@discente.ufg.br, demostenesferreira@ufg.br, assfalk@ufg.br

DOI: 10.5281/zenodo.19041290

Resumo. A manufatura por deposição de material tem se expandido amplamente na indústria com o avanço das tecnologias, especialmente a Manufatura por Deposição a Arco (MADA), uma vertente da impressão 3D aplicada à prototipagem metálica. Apesar de seu potencial, o processo ainda enfrenta desafios relacionados ao tempo de produção, precisão dimensional, propriedades mecânicas e microestruturais, além da qualidade superficial. Estudos identificaram que a corrente de soldagem tende a diminuir ao longo das camadas depositadas, sendo inversamente proporcional à Distância do Bico-Contato Peça (DBCP), que aumenta conforme o espaçamento entre camadas (GAP) se mantém constante. Essa variação compromete a uniformidade da peça, tornando essencial o controle dinâmico do GAP para manter a DBCP estável. Assim, a tensão e corrente de soldagem podem ser variáveis de controle no processo MADA. Com base nisso, foi desenvolvido um sistema automatizado de monitoramento e ajuste do GAP, utilizando a corrente de soldagem para determinar a DBCP. O sistema realiza leituras de corrente a cada camada e calcula suas médias, em seguida ajusta a altura da tocha para a próxima deposição. Ensaios experimentais foram realizados para calibrar a relação entre a corrente e a DBCP, utilizando sensor de efeito Hall para a leitura de corrente durante o processo. Embora limitações tenham impedido a fabricação completa de uma peça automatizada, a comparação com um protótipo ajustado manualmente demonstrou melhoria significativa na qualidade final da peça construída, indicando o grande potencial tecnológico do sistema em aprimorar a precisão geométrica e reduzir seu desvio de forma na fabricação no processo MADA.

Palavras-chave: MADA. DBCP. Controle. Corrente de soldagem. Ajuste.

1 INTRODUÇÃO

A manufatura aditiva é um processo de fabricação que vem ganhando cada vez mais espaço no mercado. Com os avanços tecnológicos esse processo vem se tornando cada vez mais rápido e preciso, tornando-se viável e aplicável em escala de produção. Pode ser realizado por fusão em leito de pó, deposição por energia direcionada (DED), além de soldagem a arco (LIU et al., 2020). A Manufatura Aditiva Depositada a Arco (MADA), é uma ramificação da impressão 3D voltada para fabricação de espécimes em metais. Alinhada com o uso de manipuladores robóticos e/ou mesas CNC é possível configurar quantos graus de liberdade forem necessários, permitindo a flexibilidade de fabricação de diversas geometrias, sendo elas simples ou complexas.

Conforme Huang et al. (2013), a manufatura aditiva é um processo de junção de materiais, camada sobre camada, para fabricar objetos a partir de um modelo tridimensional. No processo MADA, quando se utiliza o processo GMAW ou MIG/MAG (*Metal Inert/Active Gas*), as camadas de deposição são feitas através da fusão de um arame de alimentação protegido por um gás inerte/ativo na ponta da tocha. Cada camada é inicializada após um espaçamento no eixo perpendicular ao plano de trabalho em relação à camada anterior (comumente chamado de *GAP*).

Apesar dos avanços do MADA, este ainda possui diversas limitações. Algumas das limitações são descritas por Bartsch et al (2021), Liu et al (2020), e Wu et al (2018) estão relacionadas ao tempo necessário para a fabricação de peças, determinação e otimização de trajetórias, dissipação de calor do processo durante aplicações de peças pequenas ou que necessitem de alto aporte de calor, determinações de propriedades mecânicas adequadas às aplicações destinadas, resistência ao desgaste e à corrosão, além de defeitos recorrentes dos processos de fabricação MADA, que são presenças de vazios, trincas, dentre outros.

Arcanjo (2021) verificou que, conforme são depositadas as camadas no processo MADA, há uma tendência de diminuição da corrente de soldagem. Essa diminuição decorre de um aumento da Distância de Bico de Contato-Peça (DBCP) ao longo das deposições quando se mantém o GAP constante na trajetória da peça construída. Esse impacto da variação da DBCP se torna mais preponderante se a peça possuir um valor de comprimento elevado (aproximadamente acima de 5 cm). Lopes (2023) verificou que à medida que as camadas eram depositadas, havia uma diminuição da corrente elétrica. Esta diminuição da corrente provavelmente está relacionada com o aumento da DBCPa cada nova camada subsequente. De acordo com Scotti et al. (2008),

mantendo-se os outros parâmetros de soldagem constantes, o aumento da DBCP resultará em maiores comprimentos de arcos e, conseqüentemente, menores valores de corrente elétrica.

Logo, torna-se necessário o desenvolvimento de um sistema que monitore e determine valores de GAP variáveis ao longo do processo MADA, para assim manter a DBCP constante independente se a camada em execução é primeira, a última, ou qualquer camada intermediária. Elevando sua precisão de forma e dimensão, aprimorando assim o processo. O objetivo deste trabalho é desenvolver um sistema que monitore e determine valores de GAP variáveis no processo MADA, visando melhorias no processo principalmente em peças com valor de comprimento elevado. Tendo como objetivos específicos o estudo da relação entre a DBCP e a corrente, a criação de um sistema que faça leitura da corrente e o cálculo do GAP para a camada de referência, e a realização de ensaios para a validação do sistema para depósito de patente.

2 METODOLOGIA

2.1 Materiais Utilizados

Para a realização deste projeto utilizou-se os seguintes materiais e equipamentos:

- Unidade de controle DX100 e manipulador robótico Yaskawa Motoman HP20D;
- Fonte de soldagem multiprocesso IMC Digiplus A7;
- Placa de aquisição (National Instruments USB-6009);
- Sensor de Efeito Hall corrente LEM-600;
- Computador de processamento de sinal;
- Arduino Mega 2560;
- Optoacopladores;
- Fonte $\pm 15\text{VDC}$;
- Multímetro alicate Minipa ET-3880.

2.2 Elaboração da Rotina do Sistema

Teixeira (2023) estabeleceu em seus trabalhos variáveis de controle do processo MADA, sendo elas a corrente, tensão de soldagem e GAP. Teixeira (2023) propôs também uma rotina de leitura de corrente e ajuste do GAP. A rotina consiste na aquisição da média de corrente de soldagem da camada de referência para o cálculo de sua DBCP, esta é comparada e ajustada ao seu valor estabelecido no início do processo. Assim a DBCP é constante em todo processo às custas de um GAP variável. A rotina de ajuste e comunicação foi dividida em três programas diferentes:

o primeiro realiza a movimentação da tocha de soldagem; o segundo atua quando o programa de trajetória finaliza uma camada e o chama internamente para receber o valor do GAP ajustado; o terceiro ocorre no Arduino, que ler a corrente durante a deposição, calcula o ajuste e envia seu valor para o segundo programa adicionar o subtrair o ajuste do GAP da próxima camada.

2.3 Calibração da Leitura de Corrente

A leitura da corrente de soldagem é feita durante o arco aberto por soldagem TIG (por ser um processo de corrente contínua reduz as flutuações da leitura pelo Arduino). A corrente é lida pelo sensor Hall LEM-600 que envia um sinal analógico entre $\pm 4V$ (com faixa de leitura de $\pm 1000A$, com uma sensibilidade $250 A/V$ com um erro máximo de 1% do valor de leitura). Para a aferição da corrente de soldagem foi utilizado um multímetro com resolução de $0,1A$ e incerteza $\mu_A = \pm(2\%. leitura + 5. núm_{dígitos})$, Figura 1, e as medidas do sensor de efeito Hall adquiridas por meio do uso de uma entrada analógica A1 do Arduino.

A calibração da leitura de corrente de soldagem ocorreu de duas formas: a primeira com a utilização do mesmo sensor para a leitura tanto do Arduino quanto para a placa de aquisição da *National Instruments* (USB-6009), e a segunda com a utilização isolada do sensor apenas pelo Arduino, a fim de verificar se há interferência entre os dois instrumentos de leitura. Com os valores de corrente obtidos, com seus respectivos valores de tensão e Bits, são feitas curvas de ajuste entre tais variáveis. Os passos utilizados para a calibração estão dispostos na Figura 1 partindo do identificado (a) ao (g), os quais são descritos na sequência.

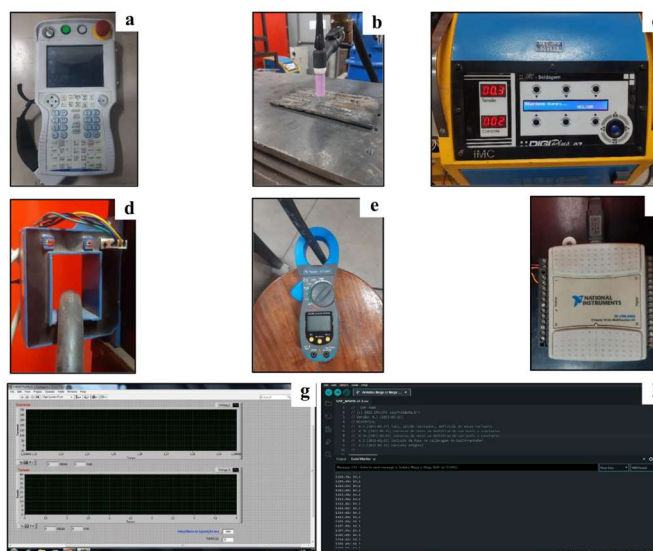


Figura 1: Passos e instrumentos utilizados na calibração.

- a) Escolher o programa de movimentação e soldagem no *teach pendant* do controlador DX100;
- b) Ajustar a trajetória de trabalho, posição de contato com a peça e a posição de arco aberto;
- c) Logo depois de definir o ponto de soldagem para a calibração é necessário escolher o nível de corrente contínua na fonte de solda para o processo TIG;
- d) Verificar as conexões entre o sensor de corrente e a placa de aquisição e/ou Arduino;
- e) Posicionar o alicate amperímetro ao redor do cabo elétrico ligado ao metal de base;
- f) A leitura de corrente é iniciada 2 s após a abertura do arco. O sensor de efeito Hall LEM-600 envia o sinal de leitura à placa de aquisição, que é lida em valor decimal pelo Arduino;
- g) A aquisição do sinal pela placa NI USB-6009 é processado no *software* LabView;
- h) As leituras realizadas pelo Arduino são processadas por um código que faz uma média de 250 amostras, que equivale a aproximadamente 1,67s de leitura;

2.4 Curva da DBCP

A curva da distância entre o bico de solda e a peça é estabelecida por experimentos com diferentes configurações de DBCP e corrente de soldagem. Tal relação é fundamental para o sistema de ajuste, pois, através dessa relação será obtida a leitura da DBCP da camada depositada. Os experimentos foram realizados como proposto por Teixeira (2023), que com seus resultados obteve uma curva de ajuste entre DBCP e corrente de soldagem. Lopes (2023) obteve valores de DBCP e corrente de soldagem ao longo da construção de paredes por solda MIG com arame de aço carbono, cujos resultados foram utilizados neste trabalho para definir a curva de ajuste entre as variáveis DBCP e corrente de soldagem

2.5 Arquitetura de Comunicação

A arquitetura de comunicação foi elaborada de forma a ajustar a tensão de trabalho e isolar eletronicamente o controlador DX100, dedicado ao manipulador robótico, e protótipo sugerido. Para isso, utilizou-se optoacopladores 5V para 24V e 24V para 5V. A comunicação entre o transdutor de corrente e Arduino é feita através das portas analógicas, que apuram os valores de corrente de soldagem na forma de bit. A comunicação entre os programas é realizada de duas formas: a primeira através do envio e recebimento de sinal digital entre o Arduino e o controlador DX100, por meio das entradas e saídas digitais que são ativadas e lidas por seus controladores

através de programas que operam nos dois; a segunda através da execução de funções entre os programas que rodam apenas no DX100.

2.6 Validação do Sistema de Ajuste

Para validar o sistema de ajuste do GAP, realizou-se a fabricação de duas peças em forma de parede, uma com o uso do sistema de ajuste e outra sem. Desta forma, será possível comparar visualmente e dimensionalmente as duas peças fabricadas. Serão avaliados também o tempo de confecção e a qualidade dimensional e superficial das camadas depositadas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Rotina do Sistema

Com base nos trabalhos de Teixeira (2023), foi criado um sistema de ajuste que realiza a leitura de corrente através de um transdutor de corrente com um Arduino, para aquisição e tratamento dos dados. Os valores obtidos são usados para calcular a DBCP da camada atual. A DBCP é enviada ao programa de ajuste, que a compara com a DBCP de referência estabelecida no programa de trajetória, para retornar o GAP da camada seguinte ao programa de confecção da peça. A rotina se divide em três partes, sendo duas delas feitas no próprio DX100 e a aquisição de dados pelo Arduino. A Figura 2 apresenta o fluxograma de rotina.

- Programa de trajetória: Este é o programa responsável em fazer a movimentação da tocha de solda para a confecção da peça desejada. Após cada camada finalizada, solicita o valor da nova posição vertical (considerando o ajuste do GAP para manter a DBCP constante) para iniciar a próxima camada. Ele envia um sinal no início da camada para que o Arduino faça a leitura e uma média da corrente de soldagem durante a deposição;
- Aquisição de dados e cálculo da DBCP: É realizado externamente ao DX100, utilizando um Arduino e um transdutor de corrente. O Arduino adquire do sensor os valores de corrente da camada e faz uma média, com a qual é calculado o valor da DBCP e valor de ajuste da camada atual (pela diferença entre DBCP ideal e real). Em seguida, o Arduino envia para o DX100 este valor de ajuste, para que ele o adicione ou subtraia no GAP da próxima camada.
- Ajuste de posição: É o programa que recebe o valor de ajuste calculado e o incrementa (caso a DBCP real lida pelo Arduino for menor que a ideal) ou decrementa no valor do GAP. Com o novo o GAP, o programa auxiliar no DX100 atualiza a variável de posição no programa principal, que realiza a movimentação na vertical e inicia a próxima camada.

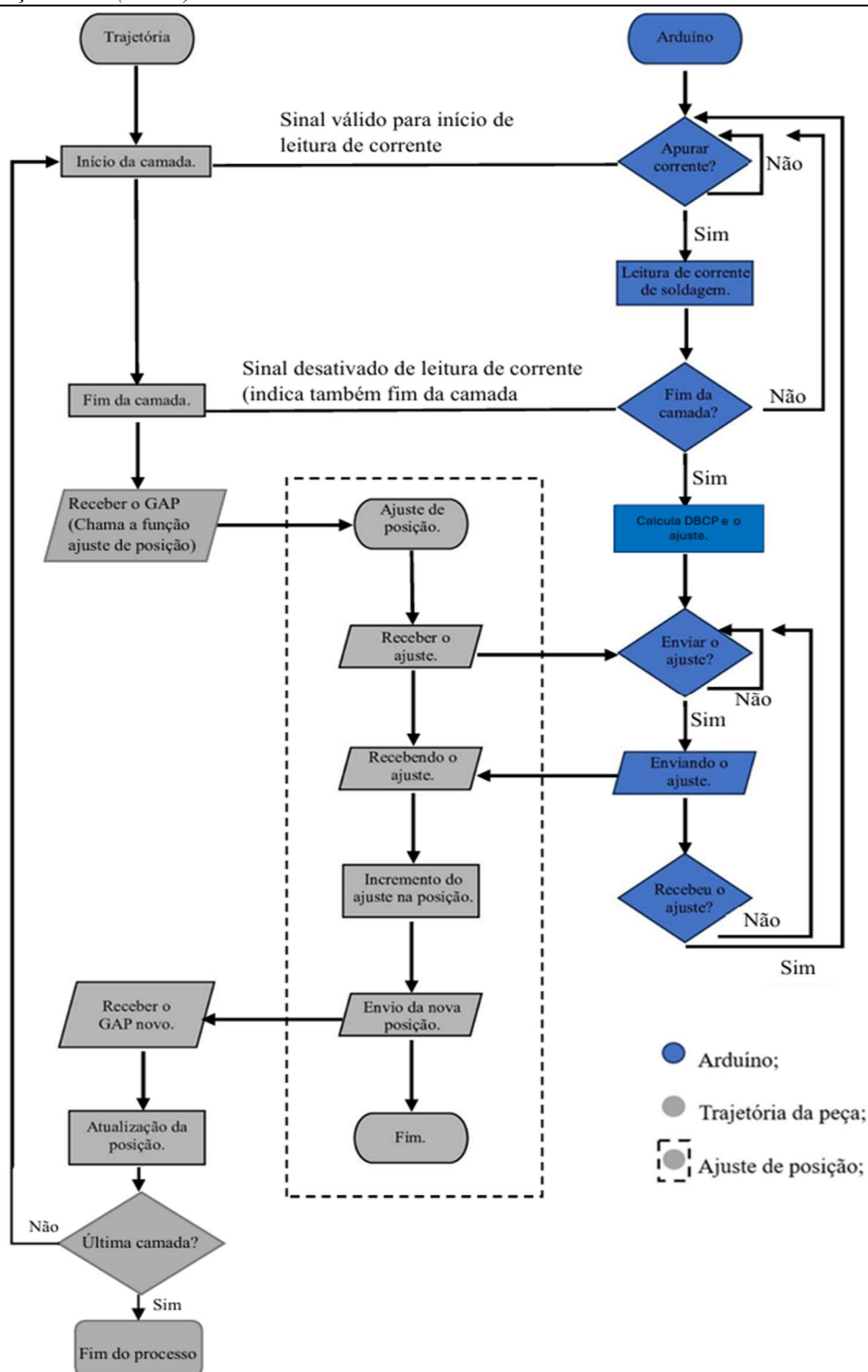


Figura 2: Rotina do Sistema de ajuste do GAP.

3.2 Leitura de Corrente

Com os experimentos realizados, obtiveram-se curvas de leitura da corrente de soldagem, que será usada para cálculo da DBCP pelo Arduino. Analisou-se que as leituras realizadas apenas

pelo Arduino foram ligeiramente diferentes das leituras feitas quando este estava ligado em paralelo com a USB-6009, resultados dispostos na Figura 3. A curva obtida quando o Arduino opera isoladamente com o sensor apresentou uma correlação linear ligeiramente menor, $R^2 = 0,9967$, que comparada quando trabalha em paralelo com a placa de aquisição da National, $R^2 = 0,9999$. Porém, quando usada a eq. (2), obtida pela leitura isolada do Arduino, esta apresentou uma menor flutuação de leitura quando compara a eq. (1), para a leitura de forma paralela. Isso foi feito para verificar a interferência de compartilhamento do mesmo transdutor de corrente para o sistema dedicado de ajuste do GAP com o sistema de aquisição e monitoramento dos parâmetros de soldagem com uso da placa de aquisição NI USB-6009. Assim, para um melhor ajuste de posição será necessário a utilização de um sensor exclusivo para o sistema de ajuste do GAP.

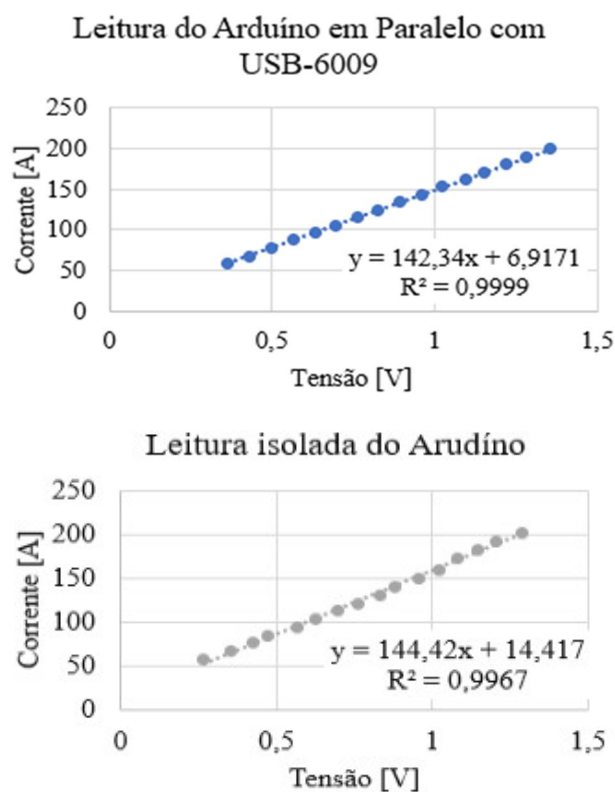


Figura 3: Curvas de ajuste para leitura da Corrente de Soldagem.

$$I[A] = 142,34.I[\text{decimal}] + 6,9171 \quad (1)$$

$$I[A] = 144,42.I[\text{decimal}] + 14,417 \quad (2)$$

3.3 Cálculo da DBCP e Gap

Os valores obtidos que relacionam DBCP e corrente de soldagem na deposição de material com uso de soldagem MIG na forma de parede estão dispostos na Figura 4. O arame utilizado foi

de aço carbono e a corrente lida em valor decimal foi convertida pela eq. (2) para valores em Ampere. Com os valores obtidos, pode-se obter a curva que relaciona a corrente de soldagem com a DBCP, que será utilizada pelo programa feito no Arduino, eq. (3). A curva obtida é também uma função do par eletrodo-peça, podendo ser ligeiramente diferente, dependendo do material do arame e da peça. O GAP é corrigido a cada camada pela diferença entre a DBCP de referência (“ideal”), estabelecida no início da fabricação da peça, com a DBCP calculada pelo o Arduino (DBCP real). O programa de ajuste calcula a diferença entre esses valores e ajusta o GAP para iniciar a próxima camada. O GAP se torna variável ao longo do processo para compensar as variações dimensionais.

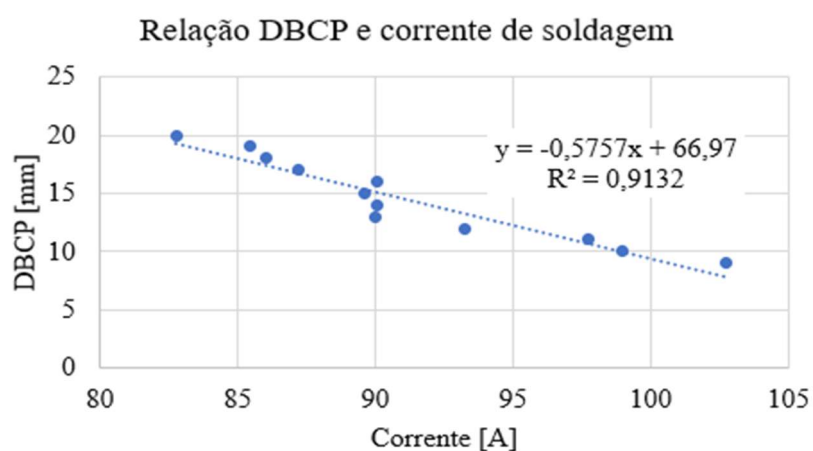


Figura 4: Curva de ajuste entre DBCP e Corrente de Soldagem.

$$DBCP[mm] = -0,5757 \cdot I[A] + 66,97 \quad (3)$$

3.4 Comunicação

A comunicação entre o programa de trajetória e ajuste de posição é feita quando uma função de ajuste é chamada, em seguida ela retorna o valor da nova posição no programa trajetória. A leitura de corrente de soldagem inicia quando o programa de trajetória ativa uma saída digital, e finaliza quando a desliga, indicando ao Arduino que a cada camada em execução foi finalizada. Ao terminar a média de corrente, o Arduino calcula a diferença de DBCP referenciada no processo e a DBCP estimada pela eq. (3), em função da corrente de soldagem lida. Em seguida, o Arduino envia um sinal para o controlador DX100, indicando que está pronto para enviar ajuste. O valor do ajuste é enviado quando o programa de ajuste que roda no DX100, que em sequência envia um pulso de resposta ao Arduino. O Arduino converte o ajuste de valor decimal para binário e o envia para o DX100 através de 6 portas digitais. A Figura 6 traz o esquema de ligação dos componentes.

A interface dos níveis de sinal lógico do Arduino (5V) para o controlador DX100 (24V) se dá por meio do uso de optoacopladores de 24V e 5V.

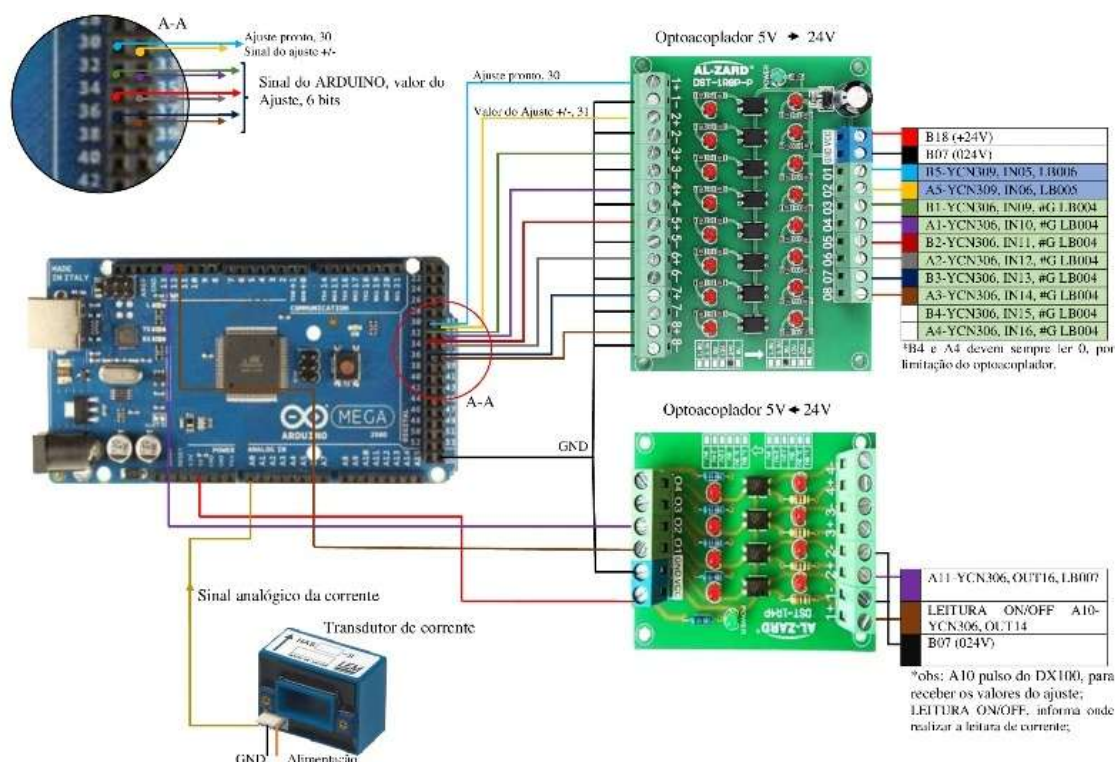


Figura 6: Esquema de ligação entre os componentes do sistema de ajuste.

3.5 Validação do Sistema de Ajuste

Por limitações de prazo do projeto, não foram fabricadas as peças com o sistema de ajuste propostos. Mas outros modelos foram fabricados, como o cilindro da Figura 7, sendo notável a irregularidade adquirida nas camadas superiores, pois acumulam uma maior temperatura e DBCP, além na diminuição da nuvem de proteção gasosa, acarretando uma deposição descontínua de material. Esperava-se que a peça possuísse 142mm de altura com 71 camadas de deposição, porém, com a irregularidade do processo sem ajuste a peça final alcançou 130mm de altura, mesmo com 71 camadas. As 15 primeiras camadas são mais uniformes pela a DBCP não sofrer tanta variação quanto nas camadas superiores.



Figura 7: Peça fabricada pelo processo MADA com GAP constante.

4 CONCLUSÕES

A corrente possui alto impacto no controle do processo, pois através dela é possível determinar a DBCP, conseqüentemente o GAP. A corrente de soldagem apresentou relação inversamente proporcional à DBCP. De acordo com a literatura, a DBCP tende a aumentar ao decorrer do processo, acredita-se que essa variação é consequência do acúmulo de calor da peça fabricada. A comunicação entre os equipamentos pode ser aprimorada pela aquisição de um software que permita o DX100 a se comunicar com sensores. Com o ajuste feito manualmente é possível verificar heterogeneidade das camadas ao decorrer da deposição das camadas, instigando ainda mais o uso do sistema de ajuste elaborado. Com o uso do sistema de ajuste do GAP variável espera-se que defeitos de dimensões e uniformidade das camadas sejam reduzidos, promovendo uma maior qualidade da peça gerada e um ganho de produtividade, em não parar o processo para ajuste manual da DBCP. Os próximos trabalhos deverão aplicar o sistema criado e fomentar a sua utilização em peças de maiores dimensões.

Agradecimentos. Os autores agradecem o apoio financeiro do Programa de Educação Tutorial (PET), ao Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação (FNDE), ao Ministério da Educação e ao corpo docente da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação.

REFERÊNCIAS

- ARCANJO, A. Influência da temperatura de interpasse no perfil de uma parede de em aço carbono fabricada por manufatura aditiva pelo processo MADA. UFG – Universidade Federal de Goiás, 2021.
- BARTSCH, H., KÜHNE, R., CITARELLI, S., SCHAFFRATH, S., FELDMANN, M., Fatigue analysis of wire arc additive manufactured (3D printed) components with unmilled surface, Structures, Volume 31, 2021, Pages 576-589, ISSN 2352-0124.
- HUANG, S. H.; LIU, P.; MOKASDAR, A.; HOU, L. Additive manufacturing and its societal impact: a literature

review. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Springer, v. 67, n. 5, p. 1191–1203, 2013.

LIU, J., XU, Y., GE, Y., HOU, Z., CHEN, S. Wire and arc additive manufacturing of metal components: a review of recent research developments. Int J AdvManufTechnol 111, 149–198 (2020).

LOPES, G. de C. Efeito da temperatura de intercamada e da adição de arame frio Manufatura Aditiva Por Deposição a Arco em aço carbono. UFG – Universidade Federal de Goiás, 2023.

SCOTTI, A. PONOMAREV, V. Soldagem mig/mag: melhor entendimento, melhor desempenho. San Pablo: Artliber,, 2008.

TEIXEIRA, E. A. Desenvolvimento e Validação de um Sistema de Controle de Altura de Intercamadas para o Processo de Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA). UFG – Universidade Federal de Goiás, 2023.

WU, B., PAN, Z., DING,D.,CUIURI,D., LI,H., XU,J., NORRISH,J., A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement, Journal of Manufacturing Processes, Volume 35, (2018), Pages 127-139, <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.08.001>.



DIGITALIZAÇÃO E CORRELAÇÃO DA IMAGEM OBTIDA PELA TÉCNICA DA FOTOELASTICIDADE COM AS TENSÕES EM MATERIAIS SUBMETIDOS À ESFORÇOS EM REGIME ELÁSTICO

¹ Kaike P. Saavedra, ¹ Marlipe G. Fagundes Neto

¹ Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação, Universidade Federal de Goiás
Alameda Ingá, quadra B, bloco 5, s/n - Chácaras Califórnia, 74045-155, Goiânia/Goiás, Brasil

kaike@discente.ufg.br, marlipe@ufg.br

DOI: 10.5281/zenodo.19041306

Resumo. A técnica da fotoelasticidade utiliza filtros polarizadores de luz dispostos a montante e a jusante de um material com propriedades fotoelásticas, permitindo a visualização de padrões de franjas associados ao estado de tensão. Trata-se, portanto, de uma técnica experimental que possibilita a análise qualitativa e quantitativa de tensões em peças submetidas a esforços. O Laboratório de Mecânica Aplicada (LabMEC/UFG) possui uma bancada de fotoelasticidade, denominada polariscópio, desenvolvida por um discente de graduação em seu trabalho de conclusão de curso. Esse projeto contemplou melhorias de um polariscópio plano, além de comparações qualitativas entre tensões observadas experimentalmente e modelos numéricos. Como desdobramentos, foram sugeridas melhorias, incluindo a adaptação para o modelo circular, a instrumentação da força aplicada e a digitalização das imagens obtidas.

Palavras-chave: Fotoelasticidade; Polariscópio circular; Tensões em regime elástico; Digitalização de imagens; Instrumentação experimental.

1 INTRODUÇÃO

A compreensão do estado de tensões em materiais é fundamental para o dimensionamento e a análise de componentes mecânicos. Entre as diferentes técnicas experimentais aplicadas nesse campo, a fotoelasticidade destaca-se por permitir a visualização direta da distribuição de tensões em peças submetidas a esforços, por meio de padrões de franjas ópticas. Essa metodologia baseia-

se na utilização de materiais fotoelásticos transparentes que, quando submetidos a carregamentos mecânicos, tornam-se birrefringentes. O processo funciona da seguinte forma: primeiro, a luz é polarizada linearmente antes de passar pela amostra; ao atravessar o material sob tensão, o feixe de luz se divide em dois, com velocidades e índices de refração diferentes. Por fim, um segundo polarizador (o analisador), posicionado após a amostra, permite que a interação entre a luz e o material crie um padrão de franjas observável.

Por meio da técnica da fotoelasticidade, um polariscópio plano retorna informações sobre dois tipos de tensões. A direção das tensões principais é revelada através das franjas isoclínicas — bandas escuras que se movem com a rotação da amostra em relação aos eixos polarizadores. Já a diferença entre as tensões principais ($\sigma_1 - \sigma_2$) é visualizada pelas franjas isocromáticas — bandas coloridas (ou escuras, sob luz monocromática) que indicam a magnitude da tensão.

Neste ponto, é importante notar a distinção entre os tipos de equipamento. O polariscópio plano permite visualizar tanto as franjas isoclínicas quanto as isocromáticas, o que pode tornar a análise complexa pela sobreposição de ambos os padrões. Em contrapartida, o polariscópio circular, por meio de lâminas de quarto de onda, elimina as franjas isoclínicas e exibe apenas as isocromáticas, facilitando significativamente a análise quantitativa das tensões.

O Laboratório de Mecânica Aplicada (LabMEC/UFG) dispõe de um polariscópio construído a partir do trabalho de conclusão de curso de um discente de graduação, que resultou no projeto e montagem de uma bancada didática para aplicação da técnica da fotoelasticidade. Embora a versão inicial tenha contemplado o modelo de polariscópio plano e análises qualitativas das franjas, foram indicadas oportunidades de aprimoramento, como a adaptação para o modelo circular, a instrumentação do sistema e a digitalização das imagens obtidas.

Nesse contexto, o presente trabalho foi desenvolvido com o intuito de dar continuidade às propostas levantadas, promovendo avanços na aplicabilidade da técnica dentro de um ambiente acadêmico e de pesquisa. A adequação do polariscópio plano para circular, a instrumentação com célula de carga e a digitalização computacional das imagens visam ampliar a precisão, a qualidade e a confiabilidade das análises experimentais de tensões. Além disso, os resultados contribuem para o projeto de pesquisa “Desenvolvimento de Aparatos de Apoio Didático-Experimental para Engenharia Mecânica”, fortalecendo o ensino prático das disciplinas da linha de Projetos de Sistemas Mecânicos.

2 DESENVOLVIMENTO

Para a realização deste trabalho foram empregados materiais e procedimentos voltados tanto para a adaptação estrutural do polariscópio quanto para sua instrumentação. O foco principal esteve na implementação de um sistema de medição da força aplicada à amostra, visando permitir análises quantitativas da técnica da fotoelasticidade.

A instrumentação foi realizada a partir da adaptação de uma balança digital de cozinha. O equipamento foi desmontado de forma a reaproveitar o layout original da placa eletrônica, incluindo o sistema de fiação e o display digital. A célula de carga da balança foi removida e acoplada mecanicamente à estrutura do polariscópio, possibilitando a medição direta da carga aplicada sobre a peça fotoelástica.



Figura 1: Bancada com o display da balança. (Fonte: Autor, 2025)

Durante os ensaios, ao aplicar esforços no material, o display da balança indicava a massa correspondente em gramas. Para converter este valor em força, foi utilizada a relação:

$$F = m * g \quad (1)$$

em que F é a força (N), m é a massa registrada pela célula de carga (Kg) e g é a aceleração da gravidade ($9,81 \frac{m}{s^2}$).

Dessa forma, tornou-se possível correlacionar a carga aplicada no polariscópio com os padrões de franjas obtidos experimentalmente, permitindo análises qualitativas e quantitativas em comparação com modelos teóricos de tensões no regime elástico.

3 METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho foi dividida em três etapas principais: a execução do ensaio experimental em um polariscópio, o desenvolvimento de um modelo numérico para simulação e a análise quantitativa da correlação entre as imagens geradas por ambos os métodos.

3.1 ENSAIO EXPERIMENTAL E AQUISIÇÃO DE IMAGEM

Após a instrumentação da bancada de fotoelasticidade, o corpo de prova (viga) foi posicionado e submetido a um carregamento conhecido. Utilizando uma fonte de luz polarizada, os padrões de franjas, que representam as linhas isocromáticas, foram gerados no material. Uma fotografia de alta resolução foi capturada para registrar o resultado experimental sob a carga aplicada, servindo como base para a comparação.

3.1 Simulação Numérica Com Análise De Malha

Paralelamente ao ensaio prático, um modelo numérico foi desenvolvido no software Autodesk Inventor 2023. Uma viga com geometria idêntica à do corpo de prova experimental foi modelada e, no ambiente de simulação, foi gerada uma malha para a análise de tensões estáticas.

As condições de contorno foram definidas para replicar o ensaio real:

- Uma das arestas da viga recebeu uma restrição fixa (engaste), que impede todos os graus de liberdade.
- Na aresta oposta, foi aplicada uma restrição de deslocamento apenas na direção vertical (eixo Y), permitindo a livre movimentação horizontal para simular um apoio móvel.
- O carregamento foi aplicado em uma região superficial similar àquela do ensaio prático para reproduzir a distribuição de força.

Uma limitação inerente a esta comparação deve ser destacada: a análise de tensões do software gera, por padrão, o campo de tensão de Von Mises, um critério de escoamento para materiais dúcteis. Em contrapartida, os padrões de franjas na fotoelasticidade estão diretamente relacionados à tensão cisalhante máxima ($\tau_{m\acute{a}x}$). Para minimizar visualmente essa divergência teórica, a barra de cores da simulação foi ajustada manualmente, buscando alinhar a paleta de cores com os padrões observados no ensaio.

3.3 Análise Quantitativa e Correlação de Imagens

Para comparar de forma objetiva os resultados do experimento e da simulação, foi desenvolvido um fluxo de trabalho computacional em Python.

Uma análise preliminar, meramente visual (Figura 2).

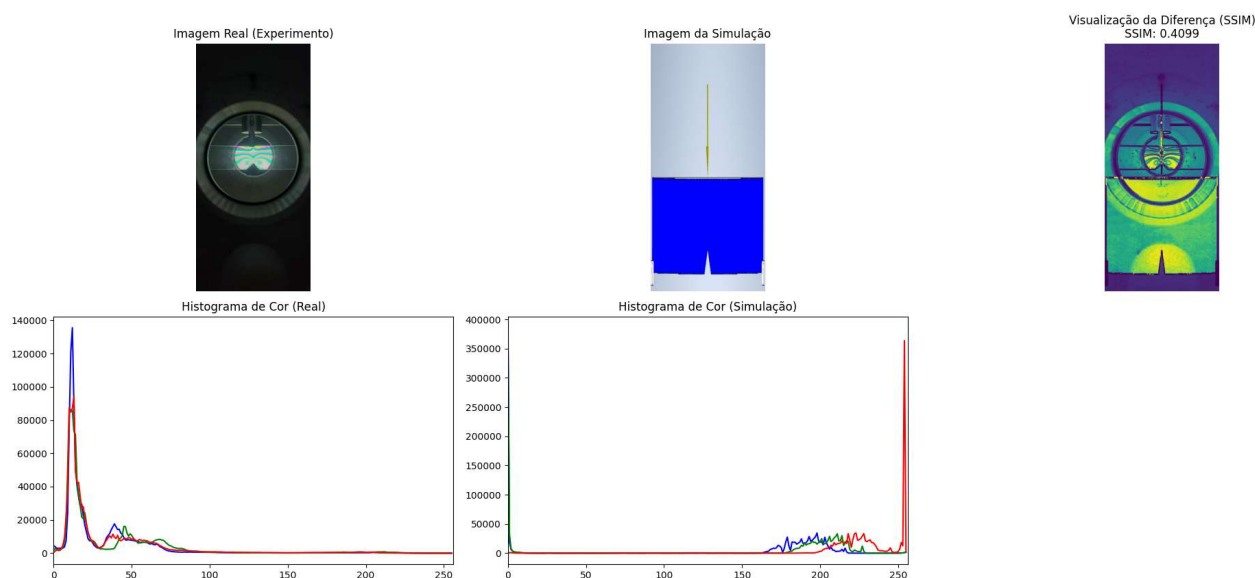


Figura 2: Análise preliminar. Fonte: Autor, 2025

Foi realizada sem tratamento prévio, revelando a necessidade de um método mais robusto e padronizado. Com isso, o processo foi estruturado em duas fases:

1. **Padronização das Imagens:** O primeiro algoritmo desenvolvido tinha como única função o pré-processamento dimensional. Ele garantia que tanto a imagem experimental quanto a da simulação tivessem exatamente a mesma resolução (mesma quantidade de pixels em largura e altura), um requisito essencial para a comparação pixel a pixel.
2. **Análise de Correlação:** Com as imagens devidamente padronizadas, um segundo algoritmo foi executado para extrair métricas quantitativas de similaridade. Os principais resultados gerados por este código são o histograma de cores e o Índice de Similaridade Estrutural (SSIM).
 - **Histograma de Cores (RGB):** Esta análise quantifica a distribuição dos canais de cor (Vermelho, Verde e Azul) em cada imagem. A comparação dos histogramas da imagem real e da simulada oferece uma medida da semelhança global em termos de paleta de cores e intensidade.
 - **Índice de Similaridade Estrutural (SSIM):** O SSIM é uma métrica avançada para medir a similaridade entre duas imagens. Diferente de outras técnicas, ele avalia a percepção de mudança na estrutura da imagem, considerando fatores como luminância, contraste e forma. Seu valor varia de -1 a 1, onde 1 representa uma identidade perfeita, e valores próximos de 0 indicam baixa semelhança. Portanto,

no contexto deste trabalho, quanto maior o valor do SSIM, mais fiel a simulação está em relação ao resultado experimental. Adicionalmente, o método SSIM gera um "mapa de diferenças", que destaca visualmente as regiões de maior divergência, auxiliando na identificação de pontos para o aprimoramento do modelo numérico.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a execução dos procedimentos descritos na metodologia, foi realizada a análise comparativa entre a imagem experimental e a captura de tela da simulação numérica. O primeiro passo consistiu na padronização dimensional de ambas as imagens por meio do algoritmo desenvolvido em Python, garantindo que possuísem a mesma resolução para viabilizar a análise de correlação pixel a pixel.

A imagem a seguir (Figura 3) apresenta o resultado da simulação lado a lado com a fotografia do ensaio experimental, já com as dimensões padronizadas.

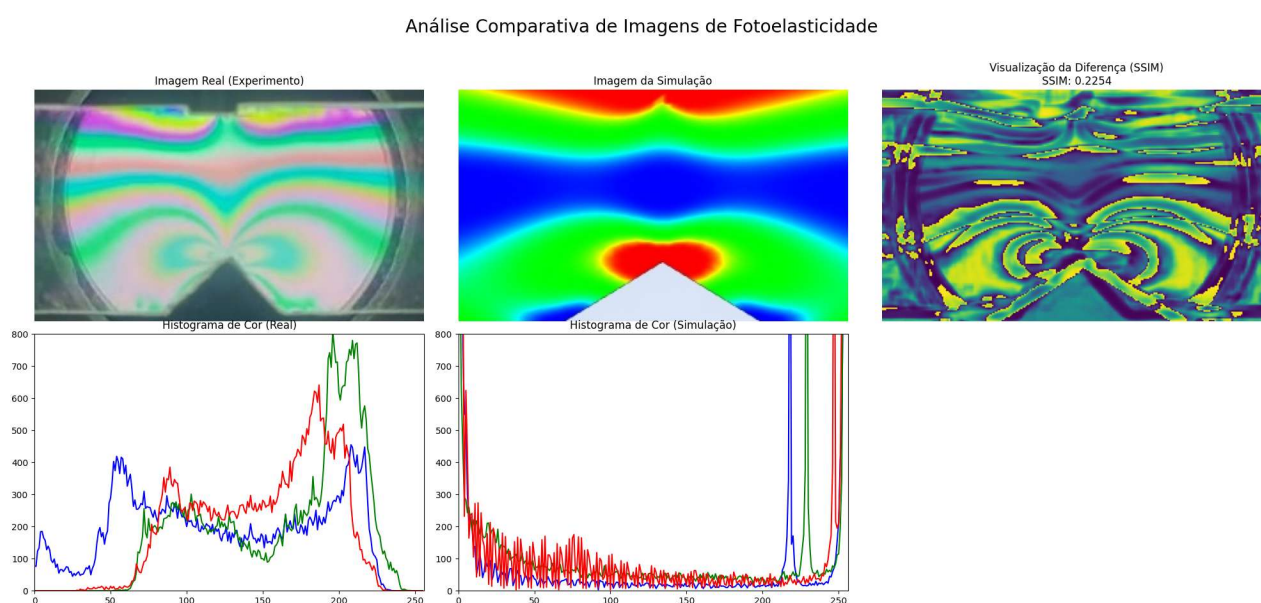


Figura 3 - Comparativo Visual entre Resultado Experimental e Simulação Numérica. Fonte: Autor, 2025

4.1 Análise Qualitativa

A partir da observação visual (Figura 3), é possível notar uma semelhança macroscópica na distribuição dos campos de tensão. O formato geral dos padrões isocromáticos na simulação acompanha a tendência observada no corpo de prova real, especialmente nas regiões de maior concentração de tensão.

Contudo, diferenças significativas também são evidentes. A principal delas reside na representação das cores. Enquanto o resultado experimental exhibe uma transição de cores suave e distribuída, a simulação apresenta cores em bandas mais demarcadas. Esta é uma limitação do software, pois mesmo com ajustes manuais na escala, a renderização gráfica não consegue replicar a distribuição contínua de cores observada na prática. Adicionalmente, a análise é impactada pela natureza distinta das tensões avaliadas: a tensão cisalhante máxima no ensaio prático versus a tensão de Von Mises na simulação. A equação de Von Mises é descrita conforme a equação 2 e a tensão cisalhante máxima conforme a equação 3.

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \sigma_2} \quad (2)$$

no qual σ_1 e σ_2 é a primeira e segunda tensão principal, respectivamente.

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \quad (3)$$

no qual σ_1, σ_2 são as tensões principais máxima e mínima respectivamente. Já $\tau_{m\acute{a}x}$ é a tensão cisalhante máxima.

Um ponto crucial a ser discutido é a magnitude do carregamento aplicado. No ensaio prático, foi aplicada uma massa de 4141g, correspondente a uma força de aproximadamente 40,6 N. Este é um valor de carga relativamente baixo. Observou-se no ambiente de simulação que, ao aplicar cargas progressivamente maiores, os padrões de tensão se tornam mais definidos e visualmente mais ricos, sugerindo que um ensaio experimental com maior carregamento poderia gerar resultados mais claros e potencialmente mais correlacionados com o modelo numérico.

4.2 Análise Quantitativa e Discussão

Para quantificar a similaridade entre as duas imagens, foi calculado o Índice de Similaridade Estrutural (SSIM). O valor obtido foi de $SSIM = 0,2254$.

O SSIM é um índice que varia de -1 (inversão total) a 1 (identidade perfeita). Um valor de 0,2254, embora positivo, indica uma baixa similaridade estrutural. Se fôssemos traduzir livremente este índice para uma escala percentual de similaridade, ele estaria em torno de 22,5%. Este resultado quantitativo confirma a análise visual: apesar de haver uma correspondência básica no formato, as diferenças na textura, contraste e, principalmente, nas cores, são muito significativas.

A discussão sobre este resultado leva à identificação de possíveis otimizações para aumentar a correlação em trabalhos futuros, visando aproximar o valor do SSIM de 1:

1. Aumento do Carregamento Experimental: Conforme observado na simulação, realizar ensaios com cargas mais elevadas (dentro do regime elástico do material) tende a produzir

franjas mais nítidas e numerosas. Isso provavelmente geraria uma imagem experimental com mais "informação" estrutural, facilitando a comparação e potencialmente aumentando o SSIM.

2. Acurácia do Modelo Numérico: A revisão detalhada das condições de contorno é crucial. Garantir que a área e a forma de aplicação da força, bem como as restrições, representem com máxima fidelidade as condições do ensaio é um passo fundamental para aprimorar o modelo.
3. Pré-processamento Avançado das Imagens: Antes da análise, as imagens poderiam ser processadas para isolar apenas as informações de interesse. A conversão para escala de cinza ou a aplicação de filtros de detecção de bordas poderiam forçar o algoritmo a comparar apenas o formato e a posição das franjas, ignorando as diferenças de cores, que já foram identificadas como uma limitação inerente do software.

Em suma, os resultados indicam que o modelo numérico atual serve como uma primeira aproximação, mas a combinação de um carregamento experimental maior com um tratamento de imagem mais focado nas estruturas pode elevar significativamente a correlação entre a simulação e a realidade física.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo principal avançar na modernização da bancada de fotoelasticidade do LabMEC/UFG, através da instrumentação do sistema de carregamento e do desenvolvimento de uma metodologia computacional para a correlação quantitativa entre resultados experimentais e simulações numéricas. A instrumentação, realizada com a adaptação de uma célula de carga, foi bem-sucedida ao permitir a medição da força aplicada, enquanto o fluxo de trabalho em Python se mostrou funcional para padronizar e comparar as imagens de forma objetiva.

A metodologia de análise quantitativa revelou uma correlação inicial modesta entre o experimento e a simulação, resultando em um Índice de Similaridade Estrutural (SSIM) de 0,2254. Este valor, que representa uma similaridade de aproximadamente 22,5%, quantifica as divergências observadas visualmente e é atribuído a um conjunto de desafios e limitações identificados. As principais fontes de discrepância foram a diferença teórica entre a tensão de Von Mises (simulação) e a tensão cisalhante máxima (experimento), a dificuldade do software em replicar as transições suaves de cores do fenômeno real e a aplicação de uma carga experimental relativamente baixa (aproximadamente 40,6 N), que gerou padrões de franjas menos definidos.

A discussão dos resultados aponta um caminho claro para o aprimoramento da correlação e para alcançar um valor de SSIM mais próximo de 1, que indicaria uma correspondência quase perfeita. As estratégias para atingir este objetivo incluem a realização de ensaios experimentais com cargas mais elevadas para intensificar os padrões de franjas, um refinamento rigoroso das condições de contorno no modelo numérico e, crucialmente, a implementação de técnicas de pré-processamento de imagem. A conversão das imagens para escala de cinza ou a aplicação de filtros de detecção de bordas forçaria a análise a focar exclusivamente na geometria e posição das franjas, neutralizando as divergências de cor que são uma limitação inerente da comparação atual.

Portanto, conclui-se que o trabalho foi bem-sucedido em estabelecer uma metodologia completa e validada para a digitalização e correlação de dados em fotoelasticidade, tendo sido aplicada na configuração de polariscópio plano. Embora o resultado quantitativo inicial seja modesto, ele serviu para diagnosticar as principais fontes de erro e estabelecer uma base sólida e um roteiro claro para pesquisas futuras. Estas incluem não apenas o aprimoramento do modelo numérico, mas também a implementação da análise com o polariscópio circular, visando aprimorar significativamente a fidelidade entre os resultados experimentais e os modelos de simulação.

Agradecimentos. Agradecimentos ao Ministério da Educação (MEC) e ao Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação (FNDE) pela manutenção do Programa de Educação Tutorial (PET). Outrossim, enormes reconhecimentos a todos os participantes do projeto em questão.

REFERÊNCIAS

- BALBINOT, A.; BRUSAMARELLO, V. J.. Instrumentação e fundamentos de medidas. 2a. LTC. 2010
- BUGYNAS, R. G., e NISBETT, J. K., Elementos de Máquinas de Shigley, 10 edição, Mc Graw Hill Education, 2016
- DALLY, J. W.; RILLEY, W. F. Experimental Stress Analysis. 3a Ed. U.S.A.: McGrawHill Book Co. 1991
- GONZALEZ, R. C. e WOODS, R. C., Processamento digital de imagens, Pearson Education, 2009
- GUIMARÃES, B. M., Projeto De Uma Bancada Didática Para Aplicação Da Técnica Da Fotoelasticidade, Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Goiás, 2023
- NORTON, R. L., Projeto de Máquinas: Uma Abordagem Integrada, 4a edição, Bookman, 2013
- SILVA, L.S. et al, Análise quantitativa de tensões em amostras fotoelásticas por meio de fotoelasticidade, Revista Brasileira de Física Tecnológica Aplicada, Ponta Grossa, 2017.



DIMENSIONAMENTO DE UM MODELO DE VEÍCULO ELÉTRICO PARA ANÁLISE EXPERIMENTAL EM TÚNEL DE VENTO

¹ José R. C. Silva, ¹ Felipe P. Mariano

¹ Laboratório de Engenharia Térmica e de Fluidos (LATEF), Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC), Universidade Federal de Goiás (UFG)
Av. Esperança, Campus universitário, 74690-900, Goiânia - GO, Brasil

raimenson@discente.ufg.br, fpmariano@ufg.br

DOI: 10.5281/zenodo.19041320

Resumo. Os Veículos Elétricos – VEs, são uma boa alternativa para redução de poluição do ar na atmosfera, entretanto, há ainda limitações como a densidade energética para tornar esta opção mais eficiente, com a otimização da sua eficiência com o aperfeiçoamento da aerodinâmica, que é necessária para superar este desafio, pois o arrasto aerodinâmico é uma das principais forças que, impacta diretamente o consumo de energia da bateria e a autonomia e alcance do veículo. Ao mesmo tempo em que a redução excessiva do arrasto pode diminuir a força de sustentação negativa (*downforce*), desestabilizando o veículo. Logo, a análise proposta permitirá a caracterização aerodinâmica de um veículo elétrico, o que é fundamental para validar modelos teóricos e propor melhorias no de projeto. No presente estudo mostra-se a aplicação da Teoria da Similaridade Incompleta para dimensionar e, posteriormente fabricar um modelo em proporção do veículo elétrico BYD SEAL, a fim de usá-lo para realizar experimentos de obtenção de forças aerodinâmicas em túnel de vento. A pesquisa, de forma global, contribuirá para o desenvolvimento de soluções que reduzam o consumo de energia, promovendo a evolução da tecnologia de VEs e a sustentabilidade.

Palavras-chave: Aerodinâmica de Veículos Elétricos. Testes em Túnel de Vento. Teoria da Similaridade. Teoria da Similaridade Incompleta. Aerodinâmica Experimental.

1 INTRODUÇÃO

A crescente substituição de veículos a combustão por veículos elétricos (VE) tem impulsionado a busca por maior eficiência energética para aumentar o alcance e autonomia dos VE. Nesse cenário, a aerodinâmica veicular se tornou uma característica importante para o projeto, pois sabe-se que a força de arrasto é um dos principais fatores que se opõem ao movimento do veículo e pode ser responsável por até 48% da resistência total à condução em velocidades de autoestrada. Consequentemente, otimizar o projeto para reduzir o arrasto é uma estratégia fundamental para melhorar a autonomia dos VE. Contudo, este processo de otimização é complexo. A redução do arrasto é diretamente proporcional à economia de combustível ou a melhor autonomia, uma vez que a resistência aerodinâmica é uma das forças a serem superadas. Entretanto, a busca por menor arrasto pode resultar na diminuição da sustentação, que é essencial para a estabilidade do veículo, especialmente em altas velocidades. Portanto, o desafio da engenharia é minimizar o arrasto sem comprometer a força de sustentação negativa ou *downforce* garantindo a segurança e o desempenho do veículo. Neste sentido, diversos estudos demonstram como modificações no design podem levar a melhorias significativas.

As pesquisas em aerodinâmica veicular tem evoluído de métodos puramente experimentais para a combinação de técnicas numéricas e experimentais. A dinâmica de fluidos computacional (CFD) surgiu como uma ferramenta econômica para o desenvolvimento de veículos. No entanto, a validação experimental, normalmente, feita em túneis de vento continua sendo essencial para verificar os resultados das simulações numéricas.

No artigo de Zabat et al. (1994), é descrita uma metodologia experimental detalhada para medir o arrasto em frotas de veículos, vide Figura 1. No estudo utilizou-se modelos em escala de 1/8 do carro *GM Lumina APV* em um túnel de vento equipado com uma balança aerodinâmica de três componentes.



Figura 17. Modelos adotados para análise (Zabat et al, 1994).

No estudo de Zabat et al. (1994), demonstrou-se que a condução em comboio reduz o coeficiente de arrasto em até 24% para carros de passeio, o que pode levar a uma economia de energia de até 10%, dependendo do ciclo de condução.

Nos artigos sobre a aerodinâmica do carros *BYD SEAL* e o *BYD Qin-Pro EV*, partes 1 e 2, de Zhang et al. (2025a) e Zhang et al. (2025b), apresenta-se uma abordagem mista, onde simulações de CFD são correlacionadas com testes em túnel de vento e testes de desaceleração livre (*coastdown*) em estrada, é um método experimental usado para medir a resistência total de um veículo real em movimento, onde coloca-se o veículo em velocidade constante e em linha reta, na sequência, coloca-se em marcha neutra e espera-se o veículo parar naturalmente.

Na Figura 2 são mostradas imagens dos sensores e aparatos experimentais de Zhang et al. (2025). No artigo Zhang et al. (2025b) mostra-se que a otimização da carroceria reduziu o coeficiente de arrasto de 0,314 para 0,227, resultando numa redução de consumo de 1,5 kWh/100 km e um aumento no alcance de 43,5 km.



Figura 18. Dispositivos de medição de pressão do EV Qin-Pro (Zhang et al, 2024)

No trabalho de Kheirkhah et al. (2025), sobre o uso de um spoiler traseiro em veículos, revelou-se que a otimização da altura e ângulo do spoiler pode melhorar a estabilidade e a eficiência aerodinâmica. Uma altura de 150 mm com ângulo de 0° (Figura 3) resultou em menor arrasto em condições normais, enquanto ângulos maiores, até 60°, aumentaram significativamente a sustentação (*downforce*) melhorando o desempenho de frenagem.

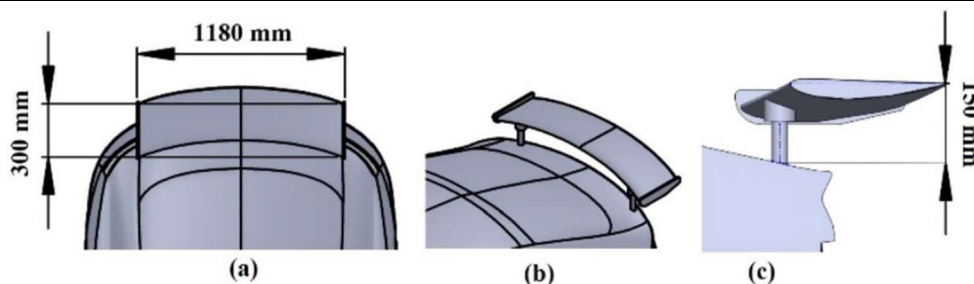


Figura 19. Vista: (a) superior, (b) geral e (c) lateral do aerofólio projetado para o Audi A5, posicionado a 150 mm (Kheirkhah et al, 2025)

Embora a importância da aerodinâmica para veículos elétricos seja amplamente reconhecida, existe uma lacuna em estudos experimentais detalhados, que forneçam dados práticos para a otimização de projetos específicos. No presente trabalho propõem-se uma análise experimental da aerodinâmica de um VE da *BYD* modelo *SEAL*, utilizando um protótipo em escala, onde o modelo de teste se dá via Controle Numérico Computadorizado – CNC, para medir forças e analisar a distribuição de pressão e a formação da camada limite.

Os objetivos do presente trabalho além da análise experimental da aerodinâmica é produzir uma metodologia experimental robusta capaz de caracterizar o comportamento aerodinâmico de VEs e fornecer dados empíricos para a otimização de futuros projetos.

2 METODOLOGIA

A condução de experimentos em túnel de vento exige uma metodologia rigorosa para garantir a validade dos resultados. Os artigos revisados detalham sobre esses desafios, destacando a necessidade de simular a estrada real, placas porosas com sucção são utilizadas na base da seção de testes do túnel de vento para minimizar a camada limite de ar que se forma e que não existe na estrada; calibrar e corrigir dados, nos estudos que foram utilizadas balanças aerodinâmicas de alta precisão teve-se que implementar correções matemáticas nas forças medidas para compensar os efeitos de bloqueio das paredes do túnel e a influência da camada limite, pois, sem essas correções, o arrasto fica superdimensionado; por fim, garantir as similaridades geométrica e cinemática é fundamental para confiabilidade das similaridade dinâmica.

A primeira etapa metodológica do presente trabalho é garantir as semelhanças geométrica e cinemática do escoamento sobre o modelo a ser testado em túnel de vento. Para tanto, tem-se disponível um túnel de vento com seção de testes de 0,46 m por 0,46 m de área transversal e 1,2 m de comprimento, e que tem uma faixa de velocidade entre 5,0 m/s e 30 m/s, vide Figura 5.

Por outro lado, o *BYD Seal* real (Figura 4), tem dimensões de comprimento $C=4,8\text{ m}$, largura $L=1,875\text{ m}$ e altura $H=1,460\text{ m}$, apesar de atingir uma velocidade máxima de 230 km/h ($63,9\text{ m/s}$) preferiu-se utilizar a velocidade máxima permitida na maior parte do Brasil de 110 km/h ($30,6\text{ m/s}$). Calcula-se o número de Reynolds máximo real (Re_r) do modelo, utilizando como comprimento característico a altura (H) do veículo:

$$Re_r = \frac{V.H}{\nu}, \quad (1)$$

onde Re_r é o número de Reynolds do veículo real, V é a velocidade máxima adotada em $[\text{m/s}]$, L é o comprimento característico adotado, ou seja, a altura do veículo, em $[\text{m}]$ e ν é o coeficiente de viscosidade cinemática do ar, considerada nos cálculos do presente trabalho de $\nu = 1,5 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$.

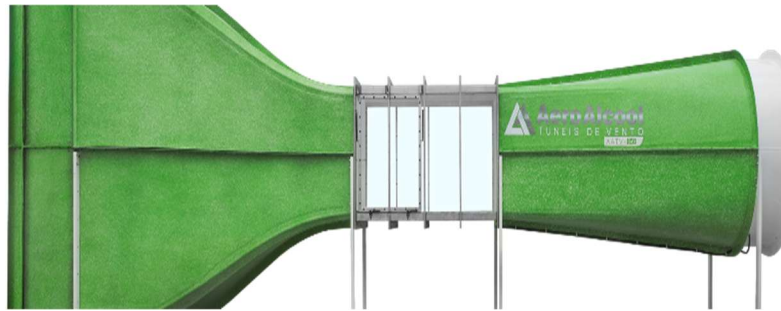


Figura 20. Túnel de vento disponível para a realização do presente trabalho, modelo AA-TVSH50 da Aeroalcool (Aeroalcool, 2025)

Substituindo os valores do veículo real e da viscosidade cinemática, na Eq. 1, tem-se, aproximadamente, $Re_r = 3,0 \cdot 10^6$. Então, para garantir a similaridade cinemática:

$$Re_r = Re_m, \quad (2)$$

onde Re_m é o número de Reynolds do modelo, ou seja:

$$\frac{V.H}{\nu} = \frac{V_m.H_m}{\nu} \quad (3)$$

Logo, tem-se dois parâmetros do modelo para serem ajustados, V_m e L_m .

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Então, adotando $H_m = \frac{1}{8H} = 0,1825\text{ m}$, tem-se:

$$V_m = \frac{V.H}{H_m} = \frac{(30,6).(1,46)}{0,1825} = 244,4 \frac{\text{m}}{\text{s}}, \quad (4)$$

ou seja, um valor que ultrapassa a velocidade máxima do túnel de vento disponível, a outra opção é adotar a $V_m=30,0 \text{ m/s}$ e obter a H_m :

$$H_m = \frac{V.H}{V_m} = \frac{(30,6).(1,46)}{30,0} = 1,49 \text{ m}, \quad (5)$$

valor que também extrapola as dimensões da seção de testes. Logo, usa-se a teoria da Teoria da Similaridade Incompleta (Çengel e Cimbala, 2012), isto é, para escoamentos sobre corpos imersos os coeficientes de arrasto e sustentação ficam constantes para escoamentos a números de Reynolds (Re) maiores de 10.000, esta teoria permite simular experimentalmente escoamentos a Re_m menores que o Re real (Re_r) e mesmo assim, obter os coeficientes de força corretos.

A restrição passa a ser que o $Re_m > 10.000$, então calculam-se o menor e o maior Re_m a partir da menor (5,0 m/s) e maior (30,0 m/s) velocidades do túnel de vento disponível, obtendo $Re_{m,min} = 6,1.10^4$ e $Re_{m,max} = 3,6.10^5$, respectivamente. Logo, a partir da Teoria da Similaridade Incompleta, é possível realizar os experimentos propostos, juntamente, com o equipamento disponível.

O modelo proposto, em uma proporção de 1/8 do veículo real, tem-se como dimensões $C_m=0,60 \text{ m}$, largura $L_m=0,23 \text{ m}$ e altura $H_m=0,18 \text{ m}$, o que está de acordo com as dimensões da seção de teste e resulta em um modelo conforme mostrado na Figura 6.

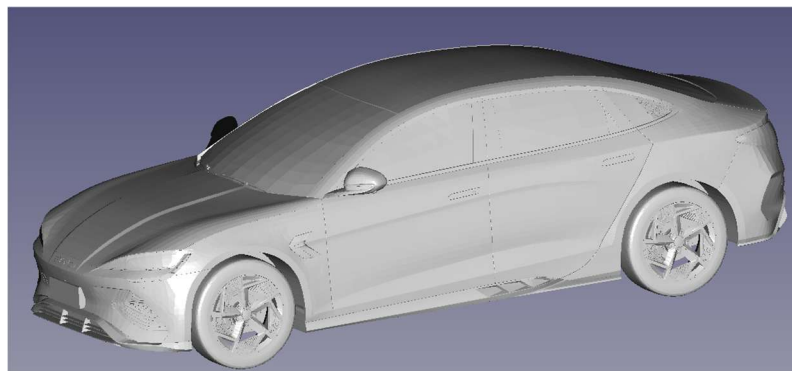


Figura 21. Modelo em escala 1:8

O modelo resultante do presente trabalho, apresentado na Figura 6, foi desenhado para ser fabricado em uma impressora 3D de filamento, neste ponto aparece mais um desafio, pois a impressora disponível tem dimensões de impressão máximas de 0,40 m x 0,40 m x 0,40 m. Então, o modelo em proporção de 1/8 do real é projetado para ser impresso em duas partes, ao longo do seu comprimento.

4 CONCLUSÕES

Com base na revisão bibliográfica e nas análises de dimensionamento realizadas a partir da Teoria da Similaridade Incompleta, estabeleceu-se uma metodologia para a análise experimental da aerodinâmica de um veículo elétrico, que inclui a calibração de instrumentos, a construção em impressão 3D do modelo em proporção de 1/8 do real, e a execução, futuramente, de testes qualitativos e quantitativos em túnel de vento e a posterior análise estatística dos resultados.

O modelo do *BYD Seal*, a escala ideal de 1/8 foi determinada como a mais adequada, pois respeita as restrições físicas de dimensão e velocidade da seção de testes do túnel de vento. Esta escala garante a similaridade geométrica necessária para a validade dos experimentos, demonstrando que é viável obter dados aerodinâmicos.

Por fim, a escolha de uma escala de proporção que considere as limitações da seção de testes é um ponto de discussão crucial. Como observado por Zabat et al. (1994), a presença das paredes do túnel de vento afeta o escoamento de ar e pode destruir a similaridade geométrica.

Portanto, como trabalhos futuros, novos modelos devem ser fabricados variando a proporção da escala em 1/12, 1/10, 1/6 e 1/5 a fim de analisar os efeitos de parede sobre os coeficientes de forças aerodinâmicas.

Agradecimentos. Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGMEC/UFG) e ao Laboratório de Engenharia Térmica e de Fluidos (LATEF/UFG) pela infraestrutura disponibilizada.

REFERÊNCIAS

- SILVEIRA NETO, Aristeu. Escoamentos turbulentos: análise física e modelagem teórica. Uberlândia: Composer, 2020.
- BARROS NETO, Benício de; SCARMINIO, Ieda Spacino; BRUNS, Roy Edward. Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria. 2. ed. Campinas: UNICAMP, 2001.
- XIN, M. et al. Avaliação calibração da seção de testes do túnel de vento. 2024.
- KHEIRKHAH, Mahdi; ROOHI, Ehsan; PASANDIDEHFARD, Mahmoud. Improving the aerodynamics of a fastback car body using a spoiler. *Scientific Reports*, v. 15, n. 1, p. 17756, 2025.
- XIN, M. et al. Avaliação calibração da seção de testes do túnel de vento. 2024.
- ZABAT, Michael et al. Drag Measurements on a Platoon of Vehicles. UC Berkeley, 1994.
- ZHANG, Fengli et al. Aerodynamic development of the BYD SEAL - Part 1: Potential optimization based on predecessor. *Proc IMechE Part D: J Automobile Engineering*, v. 1, p. 1–14, 2025.
- ZHANG, Fengli et al. Aerodynamic development of the BYD SEAL - Part 2: Overview. *Proc IMechE Part D: J Automobile Engineering*, v. 239, n. 10, p. 4881–4892, 2025.
- ÇENGEL, Yunus A.; CIMBALA, John M. Mecânica dos Fluidos: Fundamentos e Aplicações. 2. ed. Porto Alegre: McGraw-Hill, 2012.



DISPOSITIVO PARA POSICIONAMENTO AUTOMÁTICO DE ALIMENTAÇÃO EXTERNA PARA O PROCESSO DE MANUFATURA ADITIVA COM TOP TIG

¹ Cleibson S. Sousa, ¹ Daniel Souza

¹ Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação, Universidade Federal de Goiás
Goiânia/Goiás, Brasil

cleibson.silva@discente.ufg.br, daniel.souza@ufg.br

DOI: 10.5281/zenodo.19041330

Resumo. Nos últimos anos, a manufatura aditiva por deposição de cordões de solda (MADA) tem avançado significativamente, destacando-se o processo TOP TIG, que se diferencia do TIG convencional pela alimentação tangencial do arame. Embora já aplicado na produção de pré-formas metálicas, ainda não haviam sido desenvolvidos sistemas com posicionamento automático da alimentação em função da trajetória. Essa limitação compromete a estabilidade do processo, pois a posição relativa de entrada do arame varia conforme a geometria da peça. Diante disso, este trabalho teve como objetivo projetar, desenvolver e avaliar um dispositivo de posicionamento automático da alimentação externa para uso em MADA com TOP TIG. Como resultados, obteve-se a concepção e prototipagem do dispositivo inovador, com montagem de hardware e software de controle, demonstrando viabilidade prática para automação em MADA com TOP TIG. O sistema desenvolvido representa um avanço tecnológico com potencial aplicação em ambientes industriais.

Palavras-chave: TOP TIG. Manufatura aditiva. MADA. Dispositivo de Posicionamento.

1 INTRODUÇÃO

A manufatura aditiva é uma emergente tecnologia estratégica para a indústria, permitindo a produção de peças com geometrias complexas, customização em pequenos lotes e redução do desperdício de material. Embora a impressão 3D de polímeros já esteja amplamente difundida, a manufatura aditiva de metais (MADA) ainda apresenta desafios técnicos, especialmente

relacionados ao controle da deposição e às altas temperaturas necessárias para a fusão das ligas metálicas.

Entre os processos de MADA, destacam-se aqueles baseados em laser, como a Fusão Seletiva a Laser (FSL) e a Deposição de Metais a Laser (DML), e os processos a arco, como MIG/MAG, TIG e, mais recentemente, o TOP TIG. Os processos a arco apresentam vantagens relevantes, incluindo menor custo de equipamentos e insumos, maior produtividade e ausência de restrições quanto às dimensões das peças produzidas. O TOP TIG se diferencia do TIG convencional pela alimentação tangencial do arame, promovendo maior eficiência de deposição. Entretanto, a literatura não apresenta soluções que permitam o posicionamento automático do arame em função da trajetória de soldagem, o que pode gerar instabilidade e comprometer a reprodutibilidade do processo.

Diante disso, o presente trabalho tem como objetivo projetar, produzir e avaliar um dispositivo de posicionamento automático da alimentação de arame para aplicação em MADA com TOP TIG, visando a manutenção da posição relativa do arame durante toda a deposição e contribuindo para a automação do processo.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Manufatura Aditiva de Metais

A manufatura aditiva tem se consolidado como uma tecnologia estratégica para a indústria 4.0, possibilitando a produção de peças complexas, customizadas e com menor desperdício de material. Embora a impressão 3D de polímeros esteja amplamente difundida, a manufatura aditiva de metais (MAM) ainda enfrenta desafios técnicos relacionados ao controle da deposição, principalmente devido às altas temperaturas de fusão e às taxas de resfriamento das camadas (ZHANG et al., 2019).

Entre os principais processos aplicados à MAM destacam-se aqueles baseados em fonte de energia a laser, como a Fusão Seletiva a Laser (FSL) e a Deposição de Metais a Laser (DML), e aqueles baseados em processos a arco, como MIG/MAG, TIG e, mais recentemente, o TOP TIG. Os processos a arco (MADA – Manufatura Aditiva por Deposição a Arco) apresentam vantagens relevantes em relação aos processos a laser, como menor custo de equipamentos e insumos, maior produtividade e ausência de restrições de dimensões das peças (XIAOYU et al., 2020).

2.2 O Processo TOP TIG

O processo TOP TIG é uma variação do TIG convencional que se diferencia pela forma de alimentação do arame, realizada de maneira tangencial à poça de fusão. Essa configuração promove maior estabilidade do arco e melhor aproveitamento do material de adição, aumentando a eficiência da deposição (GODINHO, 2016).

Em estudos recentes, Zhang et al. (2019) investigaram o uso do TOP TIG para a fabricação de aços inoxidáveis super duplex, analisando microestrutura e propriedades mecânicas. Os resultados mostraram que a técnica pode ser aplicada com sucesso em ligas de alto desempenho. Da mesma forma, Xiaoyu et al. (2020) estudaram a aplicação do TOP TIG com dois arames na fabricação aditiva de ligas de titânio alumineto, evidenciando a viabilidade do processo e destacando melhorias na microestrutura obtida.

2.3 Lacunas Identificadas

Apesar dos avanços e da aplicação do TOP TIG em diferentes ligas, a literatura consultada não apresenta soluções relacionadas ao posicionamento automático do arame em função da trajetória de soldagem. Nos estudos existentes, a alimentação tangencial é realizada em posição fixa, o que gera limitações quando a trajetória muda devido à geometria da peça. Nesses casos, a posição relativa do arame (pela frente ou por trás da poça de fusão) varia, comprometendo a estabilidade e a reprodutibilidade do processo.

3 METODOLOGIA

3.1 Projeto e prototipagem do dispositivo

Procedeu-se ao projeto do dispositivo de posicionamento automático utilizando o software de modelagem 3D Autodesk Inventor. Foram definidos os parâmetros construtivos, o princípio de movimentação e a forma de integração com sistemas de automação e controle. Em seguida, foi produzido um protótipo inicial em polímero por meio de impressão 3D e realizando ajustes necessários de acordo com a necessidade. Esse protótipo permitiu avaliar seu acoplamento ao sistema de soldagem (tocha) e se o dispositivo realmente funciona, bem como identificar ajustes geométricos necessários para o funcionamento adequado.

3.2 Sistema de controle e interface com o robô

Para automatizar o reposicionamento do arame, foi desenvolvido um sistema de controle eletrônico integrado ao protótipo. A interface de controle permite que o alimentador ajuste sua posição conforme a trajetória do robô, mantendo a entrada do arame correta em relação à poça de

fusão. O sistema é composto por um microprocessador, responsável pelo processamento dos sinais e comando dos atuadores, e um motor de passo, que realiza o reposicionamento do arame com precisão. A Figura 1 apresenta o diagrama de funcionamento, primeiramente o movimentador da tocha para a deposição e envia um sinal para a caixa de controle que inicia o movimento de ajuste do alimentador, em seguida quando o ajuste é finalizado a caixa de controle envia um sinal de retorno para o movimentador da tocha para que este reinicie o processo de deposição, agora com o alimentador ajustado com a trajetória

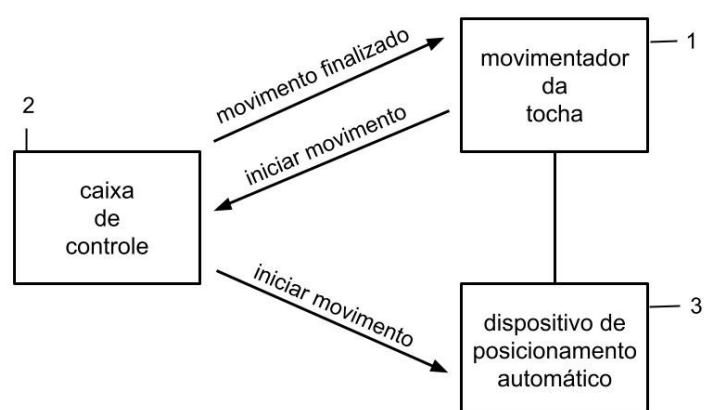


Figura 1. Diagrama de funcionamento da interface de comunicação (Autoria Própria).

Dessa forma, a metodologia aplicada permitiu não apenas a concepção do dispositivo, mas também a integração entre hardware, software e robótica, assegurando a automação do processo TOP TIG e fornecendo subsídios para sua futura aplicação em deposição metálica.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O trabalho resultou na concepção, modelagem e prototipagem de um dispositivo para posicionamento automático da alimentação externa de arame no processo TOP TIG aplicado à manufatura aditiva. O modelo tridimensional, desenvolvido no Autodesk Inventor, apresentado na Figura 2, permitiu a visualização do conceito e a análise preliminar de sua funcionalidade.

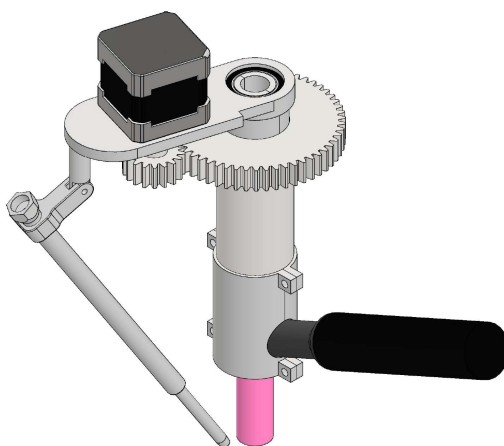


Figura 2. Modelagem computacional do dispositivo (Autoria Própria).

O protótipo foi fabricado em polímero por impressão 3D, foi montado e testado em condições de movimentação (Figura 3), entretanto, ainda sem aplicação direta em soldagem. Os testes demonstraram que o dispositivo foi capaz de realizar a correção automática do posicionamento do alimentador externo, acompanhando as variações de trajetória de forma sincronizada com o robô e evidenciando o correto funcionamento da interface de comunicação entre o protótipo e a tocha. Esse resultado valida a proposta inicial, mostrando que a concepção atende ao requisito pretendido de reposicionamento do arame. As observações realizadas durante os testes de movimentação mostram que o sistema possui potencial de aplicação em MADA. O desempenho positivo nos testes de movimentação demonstra um avanço importante, uma vez que evidencia a viabilidade do princípio de funcionamento e confirma a originalidade do dispositivo.

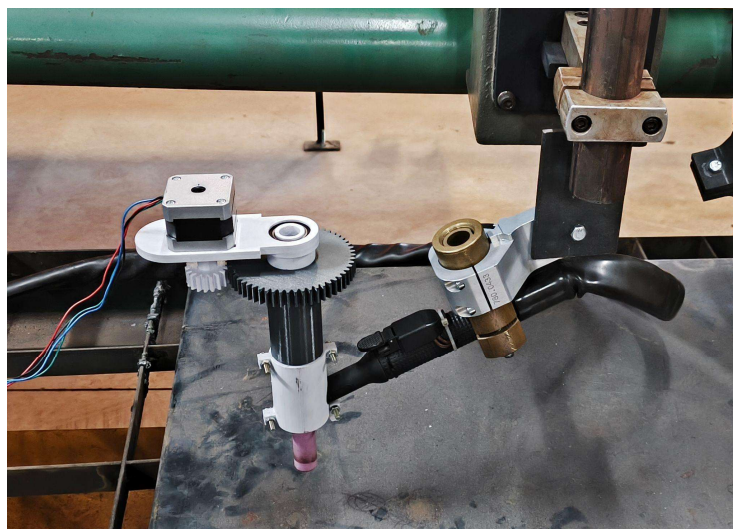


Figura 3. Dispositivo montado a mesa de movimentação da tocha (robô) (Autoria Própria)

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho permitiu o desenvolvimento de um dispositivo para posicionamento automático da alimentação externa de arame no processo de manufatura aditiva com TOP TIG. Ainda que não tenha sido testado em deposição metálica, o protótipo desenvolvido representa uma inovação prática com potencial para aumentar a estabilidade e a reprodutibilidade do processo MADA por TOP TIG. Dessa forma, o trabalho atingiu seus objetivos propostos e constitui uma contribuição significativa para o avanço da automação na manufatura aditiva.

REFERÊNCIAS

- Xiaoyong Zhang, Kehong Wang, Qi Zhou, Jialuo Ding, Supriyo Ganguly, Grasso Marzio, Dongqing Yang, Xiangfang Xu, Philip Dirisu, Stewart W. Williams, Microstructure and mechanical properties of TOP-TIG-wire and arc additive manufactured super duplex stainless steel (ER2594), *Materials Science and Engineering: A*, Volume 762, 2019, 138097, ISSN 0921-5093, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138097>.
- Xiaoyu Cai, Bolun Dong, Xianlai Yin, Sanbao Lin, Chenglei Fan, Chunli Yang, Wire arc additive manufacturing of titanium aluminide alloys using two-wire TOP-TIG welding: Processing, microstructures, and mechanical properties, *Additive Manufacturing*, Volume 35, 2020, 101344, ISSN 2214-8604, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101344>.
- GODINHO, C. Avaliação teórico-experimental de um novo conceito de tocha TIG com alimentação tangencial em aplicações de revestimento com a liga de níquel 625. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.



V CONGRESSO 20
PPGMEC 25

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

ESTADO DA ARTE E ANÁLISE BIBLIOGRÁFICA SOBRE FUNDAÇÕES MONOESTACA APLICADAS A TURBINAS EÓLICAS OFFSHORE

¹ Karen M. G. Alves, ¹ Andreia A. Nascimento, ² Marcus Vinícius G. de Moraes

¹ Universidade Federal de Goiás

Campus Samambaia Avenida Esperança, s/n. CEP: 74690-90, Goiânia/GO, Brasil

² UNB – Universidade de Brasília

Campus Universitário Darcy Ribeiro Bairro Asa Norte, CEP 70910-900, Brasília/DF, Brasil

karengomes@discente.ufg.br, aanascimento@ufg.br, mvmorais@unb.br

DOI: 10.5281/zenodo.19041346

Resumo. A fundação monoestaca é amplamente utilizada em turbinas eólicas offshore, principalmente devido à sua maior facilidade de instalação e ao menor custo de fabricação. No entanto, os efeitos hidrodinâmicos podem provocar o arraste de solo ao redor das estacas, fenômeno conhecido como erosão. Esse processo erosivo compromete a estabilidade da estrutura, colocando em risco a segurança da turbina eólica. O presente artigo baseia-se em uma análise bibliográfica realizada no âmbito de uma dissertação de mestrado, ainda em desenvolvimento, cujo título é: “Análise experimental da erosão na base de fundações do tipo monoestaca em turbinas eólicas offshore, com foco na influência do solo e na eficiência do amortecedor de massa sintonizada”. Foram avaliadas 43 obras, entre dissertações, livros e artigos científicos. A análise demonstrou que os materiais utilizados são atuais, relevantes e tecnicamente qualificados, possibilitando a construção de uma base teórica sólida. Assim, este trabalho oferece um referencial útil para futuros estudos voltados à avaliação do desempenho estrutural das fundações monoestaca e dos efeitos erosivos em seu entorno.

Palavras-chave: Referência Revisão bibliográfica; turbinas eólicas offshore; fundação monoestaca; erosão.

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por fontes de energia renovável tem impulsionado a expansão das turbinas eólicas offshore, cuja eficiência depende da estabilidade e durabilidade das fundações. De acordo com Bhattacharya (2019), dentre as alternativas estruturais, a monoestaca destaca-se como uma solução amplamente empregada em ambientes marinhos de águas rasas.

E Cheng et al. (2024) reafirma quando denomina as monoestacas como a escolha predominante em projetos offshore por causa de sua simplicidade construtiva e custo-benefício. No entanto, de acordo com Menéndez-Vicente et al. (2023), a interação entre as cargas dinâmicas induzidas pelo vento e pelas ondas, associadas à resposta vibracional da estrutura, pode causar processos erosivos significativos na região da base da fundação.

O efeito erosivo é particularmente sério em águas rasas próximas à costa, porque o fluxo e refluxo das marés criam fortes correntes. Essas correntes passam pela fundação e inicia-se o processo severo de erosão, eventualmente, criam buracos ao redor, e uma vez formados reduzem a capacidade de carga das fundações, representando uma ameaça à segurança das turbinas eólicas em ambiente offshore (Qin et al., 2023).

Este trabalho tem como objetivo principal analisar a relevância, a qualidade e a atualidade dos materiais utilizados na revisão bibliográfica realizada. A intenção é proporcionar uma base sólida e consistente de referências que permita o aprofundamento da pesquisa por meio da literatura existente, servindo de suporte para pesquisadores interessados na temática abordada e contribuindo com o meio acadêmico.

2 METODOLOGIA

A pesquisa iniciou-se com os estudos atuais, advertindo o estado da arte, sobre os modelos existentes de fundações para turbina eólica em ambiente offshore. O foco esteve voltado para as características dessas fundações como, por exemplo, sua geometria, o seu caráter físico de funcionamento, modo de instalação, comportamento estrutural e, sobretudo, o comportamento do solo.

A partir dessa análise geral, a pesquisa passou a se concentrar especificamente nas fundações monoestacas, em dois eixos principais: o desempenho estrutural e a interação solo-estrutura. No primeiro, avaliou aspectos como deformação, capacidade de carga lateral e vertical,

e a comparação entre estacas modificadas e as convencionais. No segundo foca na resposta do solo diante da presença da estaca, evidenciando fenômenos como erosão.

Os principais site de busca dos materiais foram o Portal Periódico CAPES e o ScienceDirect, utilizando como principais palavras-chaves: fundação monoestaca para turbina eólica offshore, erosão na base da monoestaca, fundação para turbina eólica offshore, e interação solo-estrutura da turbina eólica offshore.

Para realizar a análise de impacto e relevância dos artigos utilizou-se o número de citações do artigo com base na Scopus. A plataforma Clarivate foi utilizada também para avaliar as revistas considerando o fator de impacto (*Journal Impact Factor* - JIF), o indicador de citação (*Journal Citation Indicator* – JCI), o quartil e o qualis.

Na seleção dos materiais que compõem a revisão bibliográfica, foram considerados critérios como o ano de publicação, a clareza na exposição dos estudos, a relevância do conteúdo para o tema abordado e a credibilidade do veículo em que o material foi divulgado (como editoras, revistas científicas, entre outros). Ressalta-se que novos materiais poderão ser incorporados ao longo do desenvolvimento da pesquisa, conforme surgirem novas necessidades teóricas ou avanços relacionados ao tema. A seguir, apresenta-se a análise dos documentos já levantados e discutidos nesta etapa inicial.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Durante o período de março de 2025 até o presente momento, foram analisados 43 arquivos, conforme a tab. 1. Contando somente duas dissertações, três livros e trinta e sete artigos. Para a seleção dos trabalhos, considerou-se critérios como a atualidade das publicações, o número das citações e os indicadores de qualidade das revistas. Ressaltando que o um dos livros, cada capítulo é destinado a um autor, adicionando somente os autores dos capítulos utilizados, não negando que futuramente possa vir a acrescentar mais capítulos, e por consequente, mais autores do mesmo livro.

Tabela 1. Tipos de dados utilizados na revisão bibliográfica

Categoria	Trabalhos	Autores
Dissertações	2	2
Livros	3	7
Artigos	38	155
Total	43	164

Podemos separar em três categorias os arquivos: Dissertações, livros e artigos. Tornando possível analisar separadamente cada categoria. As dissertações foram dos anos 2019 e 2020, abordando temática como análise de fadiga da fundação e parâmetros geotécnicos estáticos e dinâmicos do solo. Ambas publicadas no Instituto Alberto Luiz Coimbra de pós-graduação e pesquisa de engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Os livros analisados possuem o ano de publicação de 2019, 2023 e 2024. Tais livros abordam os parâmetros de projetos de fundação monoestaca para turbinas eólicas offshore. Todos os livros são de origem de publicação internacional, *John Wiley & Sons*, *Elsevier* e a *Springer Nature*.

A Figura 1 apresenta a distribuição dos artigos científicos utilizados nesta pesquisa conforme o ano de publicação. Observa-se que as maiores concentrações dos estudos realizados para a pesquisa ocorreram no ano de 2025, representando 26,30% do total. Em seguida os anos de 2024 com 18,40% e dos anos de 2023 e 2022, ambos com 15,80%. Isto evidencia um dos critérios para a seleção dos artigos, que é a atualidade sobre a temática das fundações de turbina eólica offshore.

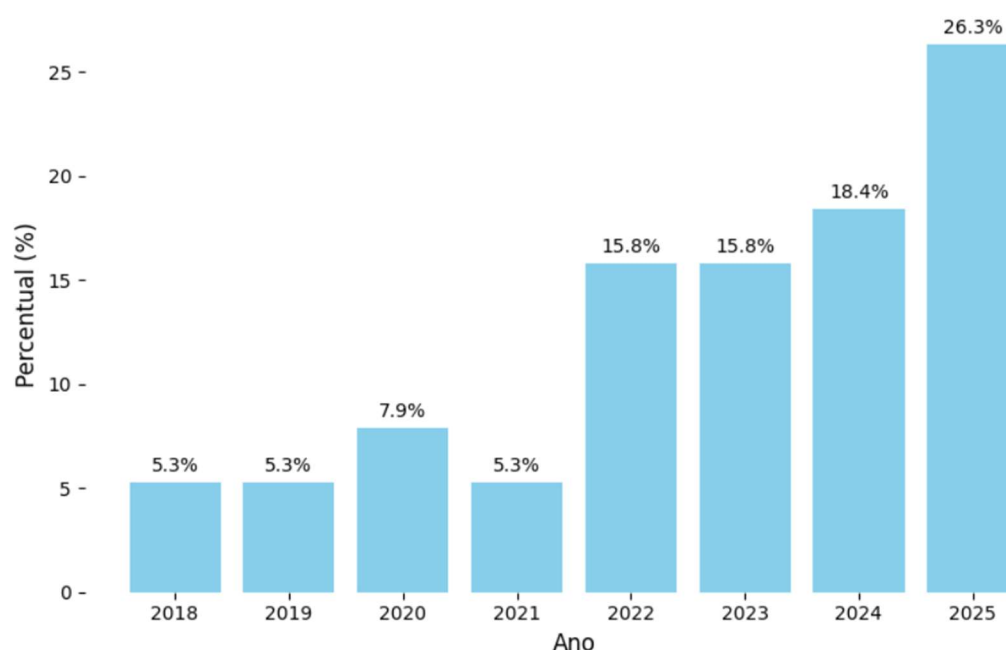


Figura 1. Distribuição dos artigos científicos de acordo com o ano de publicação (OS AUTORES, 2025)

A Figura 2 representa a distribuição percentual dos tipos de fundações abordadas nos artigos da revisão bibliográfica, nesta observa-se que a monoestaca é a mais predominante nos

estudos do tipo de fundação, representando 50,00% dos artigos. Em seguida, o mais pesquisado foi o caixão de sucção com 10,50%, enquanto a estrutura treliçada, o baseado em gravidade e o tripé caçamba de sucção, cada um com 7,90%. Por fim, a plataforma de pernas tensionadas, o star buoy e artigos que discutem de forma geral todos os tipos de fundações OWT representam 5,30% do total.

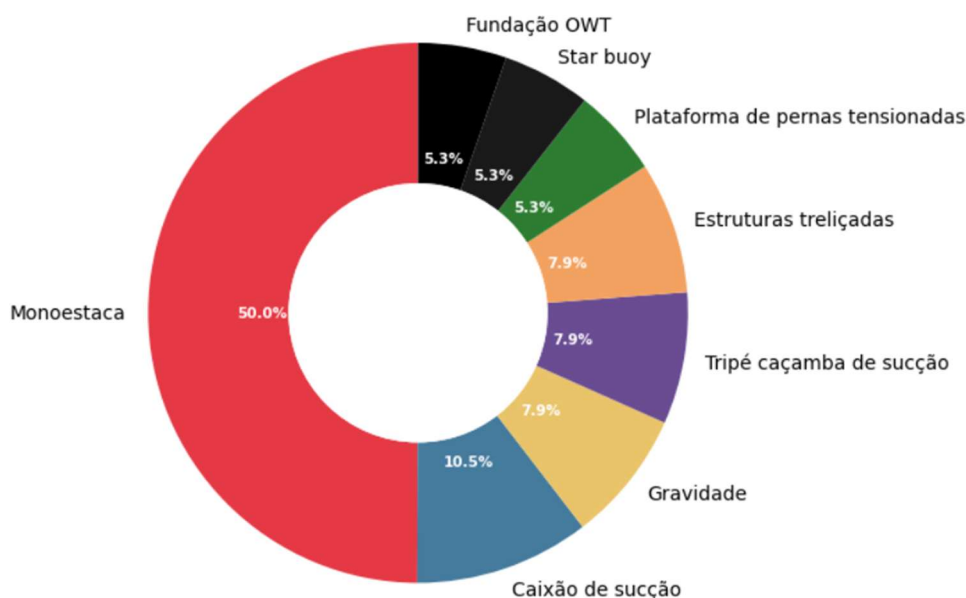


Figura 2. Distribuição dos artigos científicos de acordo com o tipo de fundação (OS AUTORES, 2025)

Os artigos dividiram-se em quatro eixos, classificados: Experimental, numérico, experimental e numérico e, artigos de revisão. O eixo 1 corresponde a 39,47% do total, composto por 356 citações, o que pode evidenciar forte relevância nesse campo. Já o eixo 2 representa 47,37% do total com 208 citações, e o eixo 3, responsável por 7,89%, registra apenas 12 citações. Por fim, o eixo 4, mesmo representando 5,26% do total soma com 263 citações.

Observando a tab. 2, é possível afirmar que o *Journal Ocean Engineering* concentra a maior parte de artigos na temática do estudo, totalizando 11 publicações, consolidando-se como a principal fonte de referência. Em seguida, destacam-se as revistas *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, *Applied Ocean Research* e *Renewable Energy*, cada uma com 4 artigos utilizados na revisão bibliográfica.

Tabela 2. Artigos científicos com suas respectivas revistas acadêmicas

REVISTAS	JIF	JCI	QUATRI L	QUALI S
Ocean Engineering	5,5	0,94	Q1	A1
Soil Dynamics and Earthquake Engineering	4,6	0,94	Q1	A1
Engineering Structures	6,4	1,12	Q1	A1
Applied Ocean Research	4,4	0,91	Q1	A1
Computers and Geotechnics	6,2	0,91	Q1	A1
Innovative Infrastructure Solutions.	2,4	-	Q2	-
Energies	4	0,65	Q1	A2
Engineering Geology	8,4	1,12	Q1	A1
Applied energy	11,2	1,12	Q1	A1
Renewable Energy	9,1	1,12	Q1	A1
Water	3	0,65	Q1	A2
Sustainable Energy Technologies and Assessments	8,67	1,12	Q1	A1
Soils and Foundations	3,3	0,7	Q2	A1
Applied sciences	2,5	0,65	Q2	A2
Renewable and Sustainable Energy Reviews	16,3	1,12	Q1	A1
International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering	3,9	0,7	Q1	A1
Journal Marine Science and Engineering	2,8	0,65	Q2	A2

A Tabela 3 reúne oito autores que fundamentam a revisão bibliográfica, o número de citações de cada um e a revista que foi publicado. Entre eles, destacam-se Qin et al. (2023) com 10 citações, publicado pela *Sustainable Energy Technologies and Assessments* e Yuan et al. (2025) com uma citação, publicado pela *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. Ambos os estudos os estudos investigam a erosão em monoestacas por meio de ensaios em centrífuga, essencial para o entendimento do comportamento erosivo nas fundações.

Enquanto Tian et al. (2025) publicado pela *Ocean Engineering* e Yu et al. (2025a) pelo *Journal Marine science and engineering*, ambos sem citações, uma vez que são estudos recentes. Ambos além de fornecerem dados do processo erosivo e desempenho estrutural da fundação,

também fundamentam o método experimental para a pesquisa. Em especial o de Yu et al. (2025a) por estabelecer melhor detalhamento experimental e maior viabilidade prática para a realização dos ensaios.

Já o estudo de Yu et al. (2025b), sem citações e publicado pela *Ocean Engineering*, explora o controle de vibrações em monoestacas, utilizando experimentos em centrífuga, aspecto que se relaciona diretamente ao problema da erosão e amplia a análise sobre os mecanismos que influenciam a estabilidade das fundações.

Tabela 3. Autores e o número de suas respectivas citações

AUTORES	CITAÇÕES	REVISTA
Wang et al. (2020)	67	Renewable Energy
Wang et al. (2018)	113	Applied Energy
Qin et al. (2023)	10	Sustainable Energy Technologies and Assessments
Alsharedah et al. (2023)	14	Ocean Engineering
Tian et al. (2025)	0	Ocean Engineering
Yu et al. (2025b)	0	Ocean Engineering
Yu et al. (2025a)	0	Marine science and engineering
Yuan et al. (2025)	1	Soil Dynamics and Earthquake Engineering

De forma complementar, os trabalhos de Wang et al. (2020) com 67 citações publicado pela *Renewable Energy*, Wang et al. (2018) com 113 citações publicado pela *Applied Energy* e Alsharedah et al. (2023) com 14 citações publicado pela *Ocean Engineering*, reiteram o entendimento do desempenho estrutural da fundação monoestaca e em componentes híbridas por meio de ensaios em centrífuga.

4 CONCLUSÕES

Iniciar o estudo dos tipos de fundações auxiliou para obter um maior entendimento a respeito de seu funcionamento, instalação, comportamento estrutural e a reação do solo. Isto permitiu obter a capacidade de aprofundamento no modelo com a maior crescente de demanda, a monoestaca. Dividir a pesquisa em duas seções distintas, desempenho estrutural e reação do solo, amparou na organização e clareza do que precisava encontrar para realizar o trabalho.

O predomínio de publicações entre os anos de 2018 a 2025 confirma a contemporaneidade da análise, assegurando que os resultados estejam em sintonia com o estado da arte do tema. Do

ponto de vista das revistas científicas, observa-se que a maior parte dos artigos foi publicada em periódicos classificados como Qualis A1 e pertencentes ao primeiro quartil (Q1). Entre elas, o *Ocean Engineering* se destacou como a principal fonte, seguido por periódicos como *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, *Applied Ocean Research* e *Renewable Energy*.

A análise de relevância dos artigos foi mensurada por quantidade de citações, por intermédio de quatro eixos. O eixo experimental, numérico e de revisão concentraram elevado número de citações, sinalizando a confiança da comunidade acadêmica em seus resultados. Já o eixo integrado experimental e numérico obteve pouca quantidade de citações, entretanto há uma baixa quantidade de artigos escolhidos nesse eixo.

A pesquisa terá como principais referências os trabalhos de Qin et al. (2023), Yuan et al. (2025), Tian et al. (2025) e Yu et al. (2025b), que tratam do problema da erosão em fundações do tipo monoestaca e das vibrações ligadas à estabilidade estrutural. Já o método experimental a ser replicado será o de Yu et al. (2025a), publicado por uma revista com o fator de impacto menor, entretanto com o melhor detalhamento e viabilidade prática com o tema da pesquisa.

Dessa maneira, os arquivos selecionados forneceram um panorama atualizado sobre as fundações das turbinas eólicas offshore e apontou os trabalhos mais relevantes para fundamentar a pesquisa teórica. A adoção de um método experimental detalhado, ainda que publicado em revista de menor fator de impacto, assegura a aplicabilidade prática necessária. Assim, o estudo estabelece uma base consistente para a continuidade da investigação, unindo atualidade, relevância e qualidade dos arquivos.

Agradecimentos. Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGMEC) pelo suporte acadêmico e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG) pelo financiamento e incentivo à pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ALSHAREDH, Yazeed A. *et al.* Centrifuge testing of improved monopile foundation for offshore wind turbines. *Ocean engineering*, v. 285, n. 115421, p. 115421, 2023.
- BHATTACHARYA, S. *Design of foundations for offshore wind turbines*. Nashville, TN, USA: John Wiley & Sons, 2019.
- CHENG, X.; LU, D.; WANG, P. *Dynamic analysis of offshore wind turbine foundations in soft clays*. 2025. ed. Singapura, Singapore: Springer, 2024.
- MENÉNDEZ-VICENTE, C. et al. Numerical study on the effects of scour on monopile foundations for Offshore Wind Turbines: The case of Robin Rigg wind farm. *Soil dynamics and earthquake engineering*, v. 167, n. 107803, p. 107803, 2023.
- QIN, B. et al. A further study on the scour around the monopile foundation of offshore wind turbines. *Sustainable energy technologies and assessments*, v. 57, n. 103198, p. 103198, 2023.

TIAN, Shuping; ZHANG, Chenrong; WANG, Zhenyu. Experimental study on the dynamic response of monopile supported offshore wind turbines in sand. **Ocean engineering**, v. 326, n. 120913, p. 120913, 2025.

WANG, Xuefei *et al.* Feasibility study of offshore wind turbines with hybrid monopile foundation based on centrifuge modeling. **Applied energy**, v. 209, p. 127–139, 2018.

WANG, Xuefei *et al.* Liquefaction characteristics of offshore wind turbine with hybrid monopile foundation via centrifuge modelling. **Renewable energy**, v. 145, p. 2358–2372, 2020.

YU, Feng *et al.* Experimental study on a laterally loaded pile under scour condition using particle Image Velocimetry technology. **Journal of marine science and engineering**, v. 13, n. 6, p. 1125, 2025a.

YU, Jianda *et al.* Damping cable-based vibration control of pile-supported offshore wind turbine tower. **Ocean engineering**, v. 338, n. 121921, p. 121921, 2025b.

YUAN, Zhouchi; LIANG, Fayun; ZHANG, Hao. Centrifuge model tests on scoured offshore wind turbines with large-diameter semi-rigid monopiles. **Soil dynamics and earthquake engineering**, v. 194, n. 109348, p. 109348, 2025.



V CONGRESSO 20
PPGMEC 25

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

ESTUDO EXPERIMENTAL DE LÃ DE VIDRO RECICLADA EM ATENUADORES SPLITTER DE GERADORES PELO MÉTODO DA SUPERFÍCIE ENVOLVENTE (ABNT ISO 8528-10)

¹ Rodrigues M. V. S., ¹ Cordeiro B. S., ¹ Fagundes Neto M. G.

¹ Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação, Universidade Federal de Goiás
Av. Universitária, n.º 1488 - Setor Leste Universitário, 74605-010, Goiânia-GO – Brasil

silva_vinicius@discente.ufg.br, cordeirosilva@discente.ufg.br, marlipe@ufg.br

DOI: 10.5281/zenodo.19041356

Resumo. Este estudo experimental investiga o reaproveitamento de resíduos de lã de vidro provenientes da produção de atenuadores acústicos para grupos geradores de energia. Foram testadas placas rígidas obtidas por aglomeração térmica de lã de vidro reciclada, aplicadas em atenuadores lamelares do modelo SLIM 250 kVA, comparando-se seu desempenho ao material convencional. O ensaio foi conduzido conforme a ABNT NBR ISO 8528-10, utilizando o método da superfície envolvente para medição dos níveis de pressão e potência sonora. Os resultados mostraram níveis médios de potência sonora próximos de 94,6 dB(A) para ambos os materiais, com diferença inferior a 1 dB(A), indicando desempenho acústico equivalente. Além disso, o uso das placas recicladas reduziu o peso total do conjunto em cerca de 8% e o tempo de montagem em aproximadamente 15%, confirmando sua viabilidade técnica e construtiva. A pesquisa demonstra que o material reciclado pode substituir com eficiência a lã de vidro tradicional, promovendo sustentabilidade e redução de resíduos industriais no setor de geração de energia.

Palavras-chave: Lã de vidro; Reciclada; Atenuador; Grupos Geradores; Níveis Sonoros.

1 INTRODUÇÃO

O controle de ruído em grupos geradores é um desafio constante da engenharia. Durante a operação, os motores a combustão – responsáveis pelo ruído – emitem altos níveis de potência sonora, frequentemente ultrapassando os limites permitidos em áreas industriais e urbanas. Para

que a mitigação desse ruído seja eficaz, é essencial que os dispositivos de controle instalados, especialmente os atenuadores lamelares, funcionem corretamente. Esses atenuadores são reconhecidos pela simplicidade na construção (HANSEN, 2009).

Estes aparelhos, que também são conhecidos como *silencer splitter*, consistem em lâminas paralelas feitas de material absorvente, especialmente lã de vidro, cobertas por chapas metálicas e organizadas em um design modular. Essa configuração garante uma atenuação que abrange uma ampla gama de frequências (KIRBY et al., 2014; CHMIELEWSKI et al., 2021).

Em ambientes industriais, os geradores de energia são cobertos por cuidados metálicos que os protegem de condições climáticas adversas e que também orientam o fluxo de ar através de dutos de entrada e saída. No sistema de descarga — que é o foco deste estudo — ou entra com temperatura baixa e fluxo laminar, o que torna mais simples avaliar o desempenho e comparar diferentes materiais internos do que no sistema de exaustão, onde os atenuadores lidam com altas temperaturas e variações de pressão (HERRIN; LIU, 2011).

A utilização desses dispositivos é bastante consolidada, mas o material absorvente mais utilizado — lã de vidro flexível — tem limitações em sua estrutura, necessitando de tirantes metálicos para travamento, o que aumenta tanto o tempo quanto o custo de fabricação. Além disso, a produção resulta em grandes quantidades de resíduos que são difíceis de descartar, (ALLARD; ATALLA, 2009). A falta de políticas industriais externas para o reaproveitamento torna ainda mais urgente a busca por soluções sustentáveis.

Portanto, este trabalho investiga a possibilidade de reaproveitar a lã de vidro excedente na fabricação de atenuadores, transformando-a em placas escavadoras por meio de uma técnica de aglomeração térmica com ligantes poliméricos, o que tornaria a instalação mais prática sem comprometer o desempenho jurídico esperado. A investigação foi realizada com um grupo gerador cuidado do modelo SLIM 250 kVA, que é produzido por uma empresa brasileira do setor.

A Figura 1 mostra como é o grupo gerador típico que foi utilizado no estudo, com o atenuador na entrada do sistema de admissão, que serve para diminuir o ruído aéreo.



Figura 1. Gerador SLIM 250 kVA com o atenuador instalado na admissão (BRG, 2025)

A pesquisa integra uma revisão bibliográfica sobre silenciadores dissipativos e materiais porosos (MUNJAL, 2014; BRUNETTI, 2012) a um estudo experimental de desempenho acústico e sustentabilidade, visando validar o uso de materiais reciclados em atenuadores industriais de grupos geradores carenados. Espera-se que os resultados contribuam para soluções mais eficientes, econômicas e ambientalmente responsáveis no controle de ruído em sistemas de potência. O objetivo deste trabalho é avaliar experimentalmente o desempenho acústico de placas de lã de vidro reciclada aplicadas em atenuadores splitter de grupos geradores, comparando-as com o material convencional conforme os critérios da ABNT NBR ISO 8528-10.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Parâmetros de atenuação de ruído

O controle do ruído em dutos e carenagens foi tema de ampla pesquisa teórica e experimental nas últimas décadas, especialmente nos trabalhos de Munjal (1987, 2014), que forneceram a base teórica para a atenuação sonora em condutos. Eles são fundamentados no comportamento de uma onda plana e na interação mista entre reflexão e absorção, possibilitando o cálculo de parâmetros essenciais, como a Perda de Transmissão Sonora indispensáveis para o projeto de atenuadores sonoros dissipativos e reativos.

A TL avalia a eficiência sonora de acordo eq. (1), é a comparação entre W_i é a potência sonora incidente e W_t a potência transmitida (MUNJAL, 1987):

$$TL = 10 \log_{10} \left(\frac{W_t}{W_i} \right) \quad (1)$$

Segundo Bies e Hansen (2009), a eficácia de um atenuador depende das propriedades físicas do material poroso, da geometria interna e da interação com o fluxo de ar. No caso de atenuadores lamelares, a absorção ocorre pela dissipação da energia em calor dentro das fibras, processo modelado pelas teorias de propagação em meios porosos descritas por Allard e Atalla (2009).

Esses autores introduzem os modelos Delany–Bazley–Miki e Johnson–Champoux–Allard, nos quais a impedância acústica característica (Z_c) e a constante de propagação complexa (k_c) de um material poroso são expressas, respectivamente, com eq. (2) e eq. (3):

$$Z_c = \rho_0 c_0 \left[1 + 0.0571 \left(\frac{f \rho_0}{\sigma} \right)^{-0.754} - j 0.087 \left(\frac{f \rho_0}{\sigma} \right)^{-0.732} \right] \quad (2)$$

$$k_c = \frac{\omega}{c_0} \left[1 + 0.0978 \left(\frac{f \rho_0}{\sigma} \right)^{-0.700} - j 0.189 \left(\frac{f \rho_0}{\sigma} \right)^{-0.595} \right] \quad (3)$$

em que ρ_0 é a densidade do ar, c_0 a velocidade do som, σ a resistividade ao fluxo e f a frequência (ALLARD; ATALLA, 2009). Essas relações permitem caracterizar acusticamente materiais fibrosos como a lã de vidro, correlacionando absorção e densidade do material.

2.2 Materiais porosos e propriedades acústicas

A lã de vidro é um material fibroso isotrópico, cuja estrutura é composta por microfibras entrelaçadas que formam um meio poroso de alta resistividade ao escoamento. O som incidente sofre múltiplas reflexões, convertendo energia acústica em calor devido à fricção viscosa e às trocas térmicas locais (BIES; HANSEN, 2009). A relação entre a absorção sonora e as propriedades físicas do material pode ser expressa pela eq. (4) do coeficiente de absorção:

$$\alpha = 1 - \left| \frac{Z_c - \rho_0 c_0}{Z_c + \rho_0 c_0} \right|^2 \quad (4)$$

Esse parâmetro também depende diretamente da impedância característica e da resistividade ao fluxo, que controlam a eficiência do material em diferentes faixas de frequência. Para aplicações industriais, recomenda-se que a resistividade ao fluxo da lã de vidro varie entre 10^4 e 10^6 Pa·s/m², valores típicos de materiais de absorção em dutos de ventilação e atenuadores (ALLARD; ATALLA, 2009). A espessura da camada e a densidade também influenciam. Segundo Munjal (2014), a frequência de ressonância associada à máxima absorção conforme eq. (5):

$$f_r \approx \left(\frac{c_0}{4d} \right) \quad (5)$$

Assim, d é a espessura efetiva da camada absorvente. Dessa maneira, o incremento na espessura move a banda de absorção para frequências menores, o que é importante para atenuar o ruído de motores a diesel, cuja faixa espectral está entre 125 Hz e 1000 Hz (BRUNETTI, 2012).

De modo geral, os clássicos materiais porosos, como a lã de vidro, ainda são muito utilizados em silenciadores industriais, visto que apresentam uma combinação de baixo custo, estabilidade térmica e alta absorção sonora (BIES; HANSEN, 2009). Literatura que aborda o uso de materiais reciclados em aplicações concretas é escassa. A maior parte das investigações foca na criação de novos materiais ou em simulações (VENEGAS et al., 2018; YAMAMOTO et al., 2024).

2.3 Desempenho acústico de atenuadores lamelares

O equacionamento que se aplica a atenuadores é bem mais complexo e se torna simplificado por meio de correlações empíricas, levando em conta a geometria e a interação entre os canais de escoamento. Segundo Munjal (1987, 2014), a Perda de Transmissão para um elemento de duto acoplado à incidência axial pode ser expressa com a eq. (6):

$$TL = 4,34 \frac{h f}{b f_c} \quad (6)$$

Assim, h representa a espessura da lamela, b o espaçamento entre as lâminas, f_c a frequência de corte acústica e f a frequência do ruído. Essa expressão, demonstra que o aumento do número de divisórias e da espessura do material absorvente tende a elevar a TL total do conjunto.

Conforme afirmam Kirby et al. (2014), um escoamento de intensidade média é capaz de diminuir a TL em baixas frequências, sobretudo quando o escoamento está na mesma direção que a propagação do som. Bordas suaves e formatos aerodinâmicos podem reduzir esse efeito. Chmielewski et al. (2021) acrescentam que a forma do atenuador também afeta a perda de carga expressa na relação adimensional da eq. (7):

$$\Delta p = q k \frac{L_0}{D_h} \quad (7)$$

Em que q é a pressão dinâmica do escoamento, L_0 o comprimento do canal, D_h o diâmetro hidráulico e k um coeficiente adimensional que se relaciona com o formato das lâminas e as condições de contorno do fluxo. A ilustração na Figura 2, de maneira esquemática, representa os fenômenos de reflexão, dissipação e escoamento entre lâminas com arredondadas e retas.

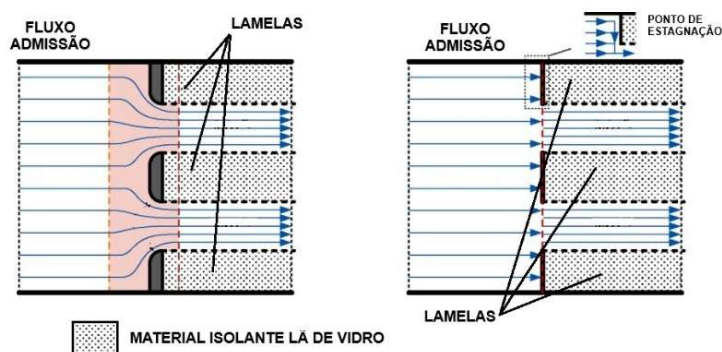


Figura 2. Escoamento em atenuadores (Adaptado de Chmielewski et al. 2021)

2.4 Sustentabilidade e reciclagem de lã de vidro

A indústria está adotando a economia circular para minimizar resíduos e reduzir o uso de matérias-primas. A lã de vidro é um material absorvente que é bastante utilizado (BIES; HANSEN, 2009). Uma mistura formada, em grande parte, por sílica e óxidos estáveis. (ALLARD; ATALLA, 2009). A Figura 3 ilustra o fluxo teórico, enquanto a Tabela 1 apresenta uma comparação entre as duas rotas.

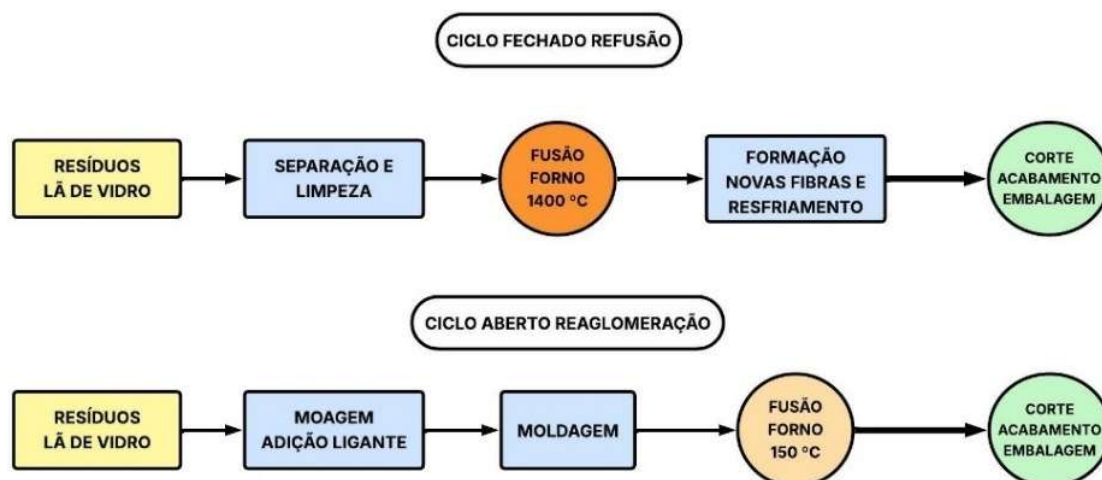


Figura 3. Fluxograma reciclagem lã de vidro (BRG, 2025)

Tabela 1. Comparativo entre processos

Critério	Ciclo fechado	Ciclo aberto
Consumo energético	Muito alto	Baixo
Custo	Elevado	Baixo
Produto	Nova lã de vidro	Placas rígidas
Vantagens	Propriedades originais	Reutilização direta
Desvantagens	Emissões elevadas	Alteração de propriedades

3 METODOLOGIA

3.1 Processo de reciclagem

Primeiramente, a lã de vidro foi obtida por aglomeração, realizada por uma empresa parceira do estudo de caso. Esse método é energeticamente eficiente e possibilita o reaproveitamento direto dos resíduos gerados na produção de atenuadores, sendo uma alternativa sustentável do tipo (open loop). A nova versão, chamada ECO 100, mede $1500 \times 400 \times 100$ mm e passou pelas seguintes etapas:

- 1) Moagem do material na máquina EP;
- 2) Adição de resinas especiais e prensagem; Moldagem em formas metálicas específicas para as placas; Secagem em estufa a cerca de 150°C ;
- 3) Refilo, acabamento das bordas e colagem.

3.2 Caracterização dos materiais

Em seguida, o material convencional LVP 25 e a placa reciclada ECO 100 foram caracterizados por meio de medições e análises qualitativas. Na Tabela 2, podemos observar as principais propriedades de ambos, enquanto a figura 4 ilustra duas amostras, uma de cada um.



Figura 4. ECO100 e LVP25 (BRG, 2025)

Tabela 2. Comparativo entre processos

Propriedade	LVP 25	ECO 100
Densidade	40 – 60 kg/m ³	100 kg/m ³
Espessura	50 mm	100 mm
Coefficiente absorção	0,82 (médio, 1000 Hz)	0,68 (médio, 1000 Hz)
Faixa térmica	25 – 250 °C	25 – 350 °C
Revestimento	Véu preto	Véu preto duplo
Dureza estrutural	Flexível	Rígida

3.3 Adaptação e reprojetado do atenuador

Para acomodar a rigidez das placas no lugar da lã convencional, foi necessário reprojetar o módulo lamelar metálico e sua montagem na estrutura. A forma externa foi preservada, mas os suportes foram removidos. O modelo foi ajustado em software CAD após a confecção e foi montado no sistema de admissão do SLIM 250 kVA, assegurando o alinhamento e a estanqueidade necessários, conforme mostrado na Figura 5.

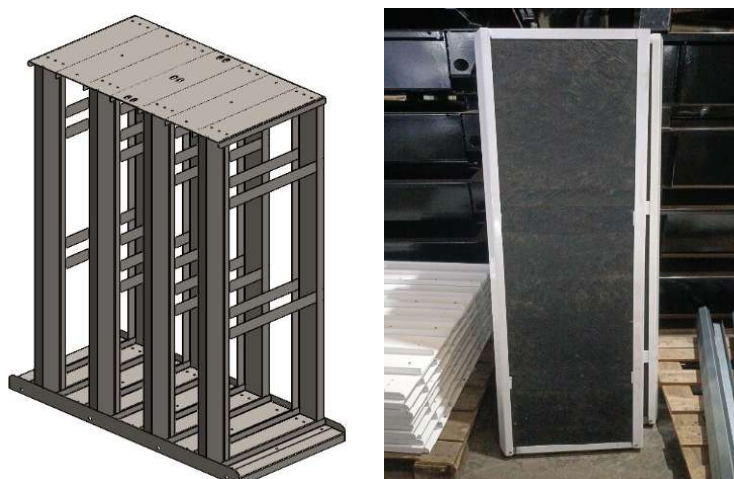


Figura 5. Projeto e montagem do atenuador lamelar (BRG, 2025)

3.4 Método da superfície envolvente ABNT NBR ISO 8528-10

O ensaio foi realizado conforme a ABNT NBR ISO 8528-10, que define o método da superfície envolvente para determinação dos níveis de pressão e potência sonora de geradores em operação. O modelo foi testado com dois atenuadores — um com lã de vidro convencional e outro com lã reciclada ECO 100. As medições foram realizadas com um sonômetro Classe 1 Brüel & Kjaer 2250, calibrado a 94 dB em 1 kHz, utilizando ponderação A e resposta lenta.

O gerador operou sob carga nominal, e com correções de ruído de fundo e ambiental. Os dados foram processados em MATLAB, permitindo a comparação direta entre os materiais. A Figura 6 apresenta o grupo gerador durante o ensaio, com o aparato experimental instalado.



Figura 6. Projeto e montagem do atenuador lamelar (BRG, 2025)

O procedimento de medição dos níveis de potência sonora seguiu os critérios normativos. O grupo gerador foi instalado sobre piso refletivo de concreto, sem barreiras próximas, operando a 75% da potência nominal. Foram registrados rotação, temperatura ambiente e torque, com tolerância de $\pm 10\%$. A superfície de medição adotada foi um paralelepípedo envolvente a 1 m do gerador ($l_1 = 2,5$ m; $l_2 = 1$ m; $l_3 = 2,2$ m), com doze pontos distribuídos.

Os valores medidos são corrigidos subtraindo-se K_{1A} (ruído de fundo) e K_{2A} (influência ambiental), conforme a norma, garantindo que os níveis de pressão (L_{PA}) reflitam apenas a emissão do grupo gerador, conforme a equação logarítmica padrão (eq. 8):

$$L_{pa} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{1}{n} \right) \sum_{i=1}^n 10^{0.1(L_{pAi} - K_{1A} - K_{2A})} \quad (8)$$

Com esses dados, determina-se finalmente o nível de potência sonora ponderado médio logarítmico a partir nível de pressão sonora (L_{WA}) da eq. (9):

$$L_{wa} = L_{pa} + 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{S_{r/a}}{S_0} \right) \quad (9)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Durante a montagem dos módulos lamelares, as placas rígidas ECO 100 mostraram boa resistência e estabilidade, permitindo eliminar os tirantes metálicos da versão convencional e reduzindo o tempo e o peso da montagem. A Figura 7 mostra os 12 pontos de medição definidos na superfície envolvente do grupo gerador, com microfones posicionados conforme a norma.

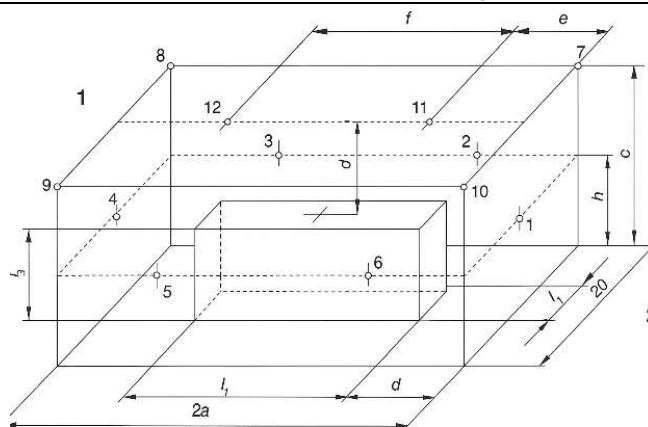


Figura 7. Disposição dos microfones envolvendo o gerador (ABNT, 2025)

Os valores obtidos em cada ponto de medição são apresentados na Tabela 3, que mostra os níveis de pressão sonora (L_{PA}) registrados para os atenuadores fabricados com lã de vidro convencional (LVP 25) e com lã reciclada (ECO 100).

Tabela 3. Comparativo entre processos

PONTO	Convencional [dB(A)]	L_{pA} ECO 100 [dB (A)]
1	75,5	83,2
2	76,8	86,0
3	81,2	81,1
4	80,2	75,7
5	79,0	78,4
6	80,8	75,6
7	81,7	77,7
8	80,3	75,8
9	76,3	80,5
10	76,6	79,2
11	79,2	79,1
12	75,5	83,2

Os valores médios ponderados em escala A foram semelhantes, após as correções de ruído de fundo e ambientais. A Tabela 4 resume os níveis médios de pressão (L_{PA}) e potência sonora (L_{WA}).

Tabela 4. Comparativo entre processos

Material	L_{PA} médio corrigido [dB(A)] e classe	L_{WA} médio corrigido [dB(A)] e classe
LVP 25	80,59 - Grau 2	94,59 - Grau 2
ECO 100	80,66 - Grau 2	94,65 - Grau 2

A diferença entre os níveis médios sonoros foi $\Delta L_{WA} = +0,06$ dB(A), $\Delta L_{pA} = +0,07$ dB(A) a favor do material reciclado, valor acusticamente equivalente dentro da incerteza de $\pm 0,5$ dB para medições de Grau 2.

O processo de aglomeração térmica da lã de vidro, portanto, não comprometeu o desempenho acústico, validando a viabilidade técnica do reaproveitamento.

Segundo Allard e Atalla (2009), a resistividade ao fluxo é o principal parâmetro de absorção sonora em materiais porosos; densidades próximas de 100 kg/m^3 , como no ECO 100, mantêm boa resposta entre 500 e 2000 Hz — faixa típica do ruído de admissão de motores a diesel. Kirby et al. (2014) e ressalta que variações geométricas ou de densidade em atenuadores produzem diferenças menores que 1 dB(A), em concordância com os resultados das Tabelas 3 e 4.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um estudo experimental comparativo entre dois tipos de materiais absorventes aplicados em atenuadores lamelares de grupos geradores carenados, conforme os critérios da norma. Os resultados demonstraram que a lã de vidro reciclada, produzida por aglomeração térmica de resíduos industriais, apresentou comportamento acústico equivalente ao material convencional utilizado atualmente, mantendo a eficiência na atenuação sonora.

O processo de reciclagem mostrou-se tecnicamente viável, de baixo consumo energético e compatível com as linhas de produção existentes, permitindo o reaproveitamento direto de resíduos e contribuindo para a implementação da economia circular no setor. Conclui-se, portanto, que a utilização de lã de vidro reciclada em atenuadores é plenamente viável, tanto do ponto de vista acústico quanto construtivo, representando uma alternativa sustentável e eficiente.

REFERÊNCIAS

- ALLARD, J. F.; ATALLA, N. Propagation of sound in porous media: modelling sound absorbing materials. 2. ed. Chichester: Wiley, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 8528-10:2021**. Grupos geradores de corrente alternada acionados por motores alternativos de combustão interna – Parte 10: Medição do ruído aéreo pelo método da superfície envolvente. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

- BIES, D. A.; HANSEN, C. H. **Engineering noise control: theory and practice**. 4. ed. Boca Raton: CRC Press, 2009.
- BISTAFA, S. R. **Acústica aplicada ao controle do ruído**. São Paulo: Edgard Blücher, 2006.
- BRG GERADORES. Site institucional. Disponível em: <https://brggeradores.com.br>. Acesso em: 4 maio 2025.
- BRUNETTI, F. **Motores de combustão interna**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2012.
- CHMIELEWSKI, B.; HERRERO-DURÁ, I.; NIERADKA, P. **Pressure loss in ducts by dissipative splitter silencers**. Applied Sciences, v. 11, n. 23, p. 10998, 2021. DOI: 10.3390/app112310998.
- HERRIN, D. W.; LIU, Z. **Advances in the use of micro-perforated materials for noise control**. Noise Control Engineering Journal, v. 59, n. 1, p. 21–29, 2011. DOI: 10.3397/1.3548852.
- KIRBY, R.; CUMMINS, A.; MUKHERJEE, P. **On the acoustic performance of rectangular splitter silencers in the presence of mean flow**. Journal of Sound and Vibration, v. 333, p. 6295–6311, 2014. DOI: 10.1016/j.jsv.2014.06.011.
- MUNJAL, M. L. **Acoustics of ducts and mufflers**. New York: Wiley, 1987.
- MUNJAL, M. L. **Acoustics of ducts and mufflers: with application to exhaust and ventilation system design**. 2. ed. New York: Wiley, 2014.
- VENEGAS, R.; et al. **A three-dimensional analytical approach for large rectangular silencers**. Applied Acoustics, v. 128, p. 10–19, 2018. DOI: 10.1016/j.apacoust.2017.07.012.
- YAMAMOTO, T.; AKIMOTO, Y.; HOSOMI, N. **A homogenization method used to predict the performance of silencers**. Applied Acoustics, v. 219, 2024. DOI: 10.1016/j.apacoust.2023.109336.



ESTUDO NUMÉRICO DE CONVECÇÃO FORÇADA EM CAVIDADE

¹ Paul D. Oluwafemi, ¹ Andreia A. Nascimento

¹ Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Escola de Engenharias Elétrica, Mecânica e de Computação, Universidade Federal de Goiás
74.690-900, Goiânia/Goiás, Brasil

paul.deniya@discente.ufg.br, aanascimento@ufg.br

DOI: 10.5281/zenodo.19041364

Resumo. Este trabalho apresenta um estudo numérico de convecção forçada em uma cavidade quadrada bidimensional ventilada por um jato frio. O objetivo é examinar os efeitos da ventilação na recirculação do fluxo e na distribuição térmica sob condições de regime permanente. As equações governantes de massa, momento e energia são resolvidas na forma adimensional utilizando o método dos volumes finitos para número de Reynolds $Re = 100$ e número de Prandtl $Pr = 3$. Os resultados mostram que o jato de entrada gera uma recirculação dominante no sentido horário, acompanhada por vórtices secundários próximos aos cantos da cavidade. Ao longo da trajetória do jato, o resfriamento intenso reduz a temperatura adimensional na região central, enquanto as paredes aquecidas mantêm fortes gradientes térmicos próximos a elas. Os perfis de velocidade e de temperatura são apresentados e discutidos nos resultados. A análise mostra que a ventilação induzida pelo jato modifica efetivamente a estrutura do fluxo e melhora a remoção térmica em geometrias confinadas, corroborando com os resultados obtidos na literatura.

Palavras-chave: Convecção forçada. Cavidade ventilada. Método dos Volumes Finitos. Transferência de calor.

1 INTRODUÇÃO

A ventilação em cavidades tem impacto direto na eficiência térmica de sistemas como eletrônica e trocadores de calor. Em regimes forçados, a interação entre o jato de entrada e as recirculações internas determina a transferência de calor e a estratificação térmica. Para

compreender e otimizar essas interações, pesquisadores têm recorrido tanto a simulações experimentais quanto a simulações numéricas, o que permite uma análise detalhada do comportamento do escoamento e da distribuição de temperatura (Hussien et al., 2021, Ars et al., 2021, Emesu et al., 2025, Hong et al., 2017).

A ventilação é fundamental para o conforto térmico, a qualidade do ar e a eficiência energética em ambientes internos. A ventilação natural, embora energeticamente favorável, depende das condições externas (Varodompun & Navvab, 2007). Já a ventilação forçada garante maior controle do fluxo de ar e da temperatura, porém com maior consumo de energia (Awbi, 2017).

Estudos numéricos de cavidades ventiladas têm revelado interações complexas entre a dinâmica do jato de entrada e as estruturas internas do escoamento, e.g, jatos frios introduzem gradientes térmicos acentuados e zonas de recirculação que influenciam significativamente a transferência de calor por convecção (Mioralli et al., 2017, Zhang et al., 2015). Além disso, fatores como configuração das aberturas de entrada e saída, o número de Reynolds (Re) e a velocidade do jato são parâmetros-chave que determinam a formação de vórtices e a estratificação térmica (Feng et al., 2025, Saeidi & Khodadadi, 2006).

O presente trabalho investiga a formação de recirculações internas, o desenvolvimento do jato de entrada e a distribuição de temperatura no interior de uma cavidade ventilada submetida a convecção forçada laminar, utilizando o software OpenFOAM. O objetivo é compreender a interação entre a dinâmica induzida pelo jato e o comportamento do escoamento no interior da cavidade, contribuindo assim para o desenvolvimento de sistemas de ventilação e resfriamento mais eficientes. Os resultados evidenciam como o escoamento induzido pelo jato impacta a estratificação térmica, a evolução dos vórtices e a transferência de calor por convecção, oferecendo subsídios para a otimização de geometrias de cavidades e configurações de entrada em sistemas de engenharia aplicados.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Problema físico

Este estudo investiga o escoamento laminar e a transferência de calor em um espaço confinado, impulsionados por um jato de ar frio que entra pela parte superior de uma das paredes verticais e sai pela parede vertical oposta, próximo à base. O modelo físico é inspirado em um cenário real de gestão térmica, com aplicações relevantes na engenharia e em sistemas de climatização (HVAC).

Tal configuração é comum em sistemas de resfriamento de eletrônicos e ventilação localizada.

Nesses casos, o ar frio é introduzido na parte superior de uma das paredes com o objetivo de deslocar o ar quente e resfriar o ambiente interno. Essa configuração promove estratificação térmica e circulação natural dentro do recinto, sendo essencial para a manutenção de temperaturas adequadas de operação de equipamentos ou para garantir o conforto térmico em edifícios.

A Figura 1 ilustra uma representação tridimensional desse sistema, no qual um jato frio horizontal é introduzido na porção superior da parede esquerda, enquanto o ar aquecido é expelido por uma saída localizada na parte inferior da parede oposta. Ressalta-se que somente a entrada possui escoamento imposto, enquanto a saída permite o escoamento natural do fluido para fora da cavidade. As paredes internas são tipicamente mais quentes devido à presença de fontes de calor (como dispositivos eletrônicos ou radiação solar), o que favorece a transferência de calor para o jato de ar frio que entra no domínio.

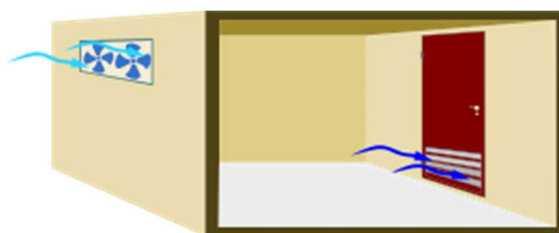


Figura 1: Esquema tridimensional ilustrativo de uma sala resfriada com jato de ar frio entrando pela parte superior esquerda e escoamento saindo naturalmente pela parte inferior direita

Para reduzir a complexidade computacional e focar nos mecanismos fundamentais de escoamento e transferência de calor, o sistema físico é simplificado para uma cavidade quadrada bidimensional, mantendo as características gerais do escoamento. Essa geometria simplificada é apresentada na Figura 2. A seguir, são descritos o modelo matemático e a abordagem numérica empregados para representar o escoamento e a transferência de calor nesta cavidade bidimensional.

2.2 Modelo matemático

O escoamento do fluido e a transferência de calor na cavidade são regidos pelas equações de Navier-Stokes, (Eq. 1), equação da conservação da massa, (Eq. 2), e à equação de energia, (Eq. 3), para o escoamento assumido incompressível, laminar e bidimensional. As condições de contorno são especificadas como valores fixos de velocidade e temperatura na entrada, enquanto condições de zeroGradient são aplicadas na saída, permitindo o desenvolvimento natural do escoamento e da distribuição térmica.

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{u}, \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) T = \alpha \nabla^2 T + \frac{q}{\rho c_p}, \quad (3)$$

onde $\mathbf{u} = (u, v)$ vetor velocidade do fluido, p pressão do fluido, ρ massa específica do fluido, ν viscosidade cinemática do fluido, T temperatura do fluido, $\alpha = \frac{k}{\rho c_p}$ difusividade térmica, onde k é a condutividade térmica e c_p é o calor específico, q fontes internas de calor por unidade de volume.

As equações governantes são adimensionalizadas usando escalas características de comprimento $\left(X = \frac{x}{H}; Y = \frac{y}{H}\right)$, velocidade $\left(U = \frac{u}{u_{in}}; V = \frac{v}{u_{in}}\right)$, pressão $\left(P = \frac{p}{\rho u_{in}^2}\right)$ e temperatura $\left(\theta = \frac{T - T_{in}}{T_w - T_{in}}\right)$, onde u_{in} é a velocidade de entrada, T_{in} e T_w são as temperaturas de entrada e da parede, respectivamente.

Os principais parâmetros adimensionais são o número de Reynolds $(Re = \frac{u_{in} L}{\nu})$, que caracteriza a razão entre forças inerciais e viscosas; o número de Prandtl $(Pr = \frac{\nu}{\alpha})$ que relaciona a difusividade do momento à difusividade térmica; e o número de Nusselt $(Nu_x = -\frac{\partial \theta}{\partial n}|_{wall})$, que mede a transferência de calor por convecção em relação à condução. Esses parâmetros auxiliam na avaliação de como o jato frio influencia a mistura do escoamento, o desenvolvimento de vórtices e o desempenho térmico dentro da cavidade.

Com base nas equações governantes (Eq.1-3) e nos parâmetros adimensionais definidos anteriormente, as equações adimensionais do escoamento podem ser expressas como:

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad (4)$$

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) \quad (5)$$

$$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) \quad (6)$$

$$U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = -\frac{1}{Re Pr} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \right) \quad (7)$$

2.3 Modelagem numérica

O modelo numérico foi desenvolvido para simular o escoamento laminar e bidimensional e a transferência de calor em uma cavidade com jato frio de entrada. A solução das equações governantes, já apresentadas no modelo matemático, foram discretizadas pelo método dos volumes

finitos utilizando o software OpenFOAM, permitindo a análise do comportamento do escoamento e da distribuição térmica de forma eficiente e preliminar. Com base nesse modelo, a seguir são detalhadas a geometria do domínio e as condições de contorno adotadas para a simulação.

Conforme discutido na Seção 2.1, a modelagem numérica considera uma cavidade bidimensional, representação suficiente para capturar os principais efeitos da ventilação forçada no interior do domínio.

O domínio computacional consiste em uma cavidade quadrada bidimensional de lado $H = L$. A ventilação é imposta por um jato frio de entrada, introduzido na porção superior da parede vertical esquerda, abrangendo de $y = 0,75H$ a $y = H$, enquanto a saída está localizada na porção inferior da parede vertical direita, entre $y = 0$ e $y = 0,25H$.

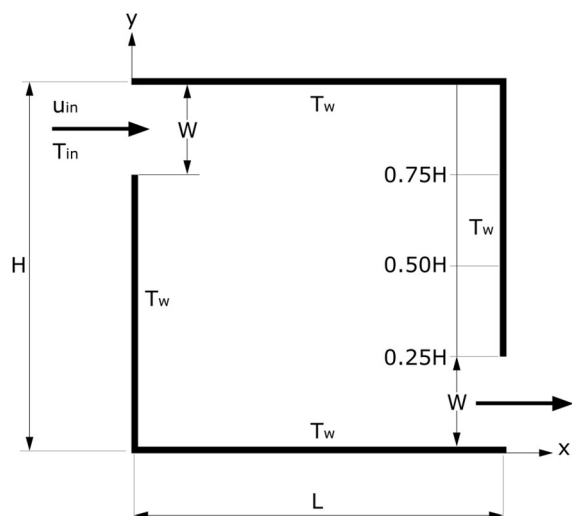


Figura 2: Esquema da cavidade ventilada com entrada e saída.

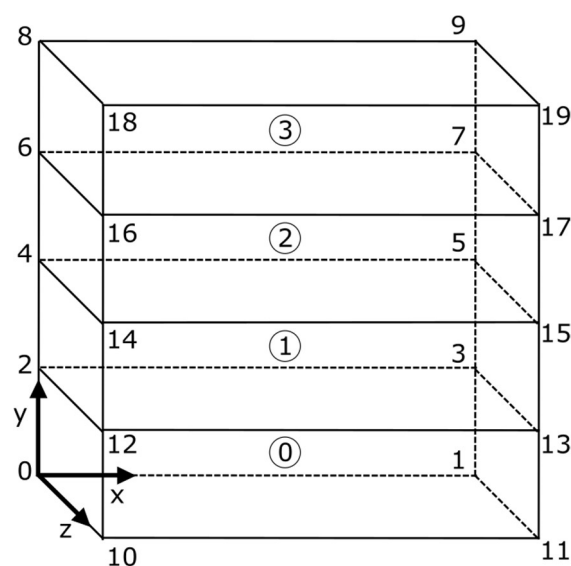


Figura 3: Estrutura de blocos da malha para a cavidade (números de blocos circulados).

As condições de contorno consideram um jato frio de entrada com velocidade uniforme ($U = 1, V = 0$) e temperatura $\theta = 0$, enquanto a saída apresenta condições de zero-gradiente para velocidade e temperatura, permitindo o escoamento natural. Todas as paredes da cavidade

obedecem à condição de não deslizamento ($U = V = 0$) e mantêm temperatura constante $\theta = 1$, assegurando o desenvolvimento do escoamento e da distribuição térmica no interior da cavidade.

As simulações foram realizadas com o solver *buoyantSimpleFoam* do OpenFOAM, adequado para escoamentos laminares incompressíveis com convecção térmica. O domínio computacional foi dividido em quatro blocos estruturados usando o utilitário *blockMesh* Figura 3, permitindo a definição precisa da entrada e saída ao longo das paredes laterais verticais da cavidade. Ao atribuir a condição de contorno vazia na terceira dimensão, a malha utilizada é bidimensional, estruturada e uniforme em todo domínio com 160×160 volumes. Os termos convectivos e difusivos das equações foram discretizados com esquemas de segunda ordem, enquanto o acoplamento pressão-velocidade foi realizado pelo algoritmo SIMPLE.

Para assegurar a estabilidade e a convergência das simulações, foram adotados critérios de tolerância residual adequados, 10^{-6} .

Simulações adicionais foram conduzidas para $Re = 50, 100$ e 500 , e $Pr = 0,7, 3$ e 5 , mantendo a mesma malha uniforme de 160×160 volumes. Os Nu_x calculados estão listados na Tabela 1, juntamente com os valores de referência correspondentes. Os resultados mostram boa concordância entre as condições estudadas, confirmando a confiabilidade da presente implementação.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O comportamento geral do escoamento dentro da cavidade é ilustrado na Figura 4, a qual mostra as linhas de corrente. Uma recirculação dominante no sentido horário ocupa a maior parte da cavidade, sendo impulsionada pelo jato frio que entra pelo canto superior esquerdo. Além disso, um vórtice secundário em rotação contrária é observado próximo ao canto superior direito, enquanto um vórtice menor se forma próximo à parede inferior esquerda.

A Figura 5 apresenta a distribuição de temperatura adimensional correspondente θ . O núcleo da cavidade se resfria até $\theta \approx 0$, seguindo a trajetória do jato, enquanto $\theta \approx 1$ é mantido próximo às fronteiras superior e inferior aquecidas. A distribuição é assimétrica: o lado esquerdo é fortemente influenciado pelo jato, enquanto o lado direito apresenta recuperação térmica mais lenta devido à mistura mais fraca.

Os valores de Nu_x obtidos no presente estudo estão muito próximos aos de Mioralli et al. (2017), uma vez que ambos os estudos utilizaram a mesma simulação e o mesmo software, com parâmetros idênticos. Observa-se que Nu_x aumenta com o aumento de Pr e de Re , indicando que fluidos com maior difusividade térmica e fluxos mais rápidos promovem maior transferência de

calor. Pequenas diferenças observadas entre os resultados podem ser atribuídas a tolerâncias numéricas ou discretizações, não comprometendo a consistência e a confiabilidade dos resultados.

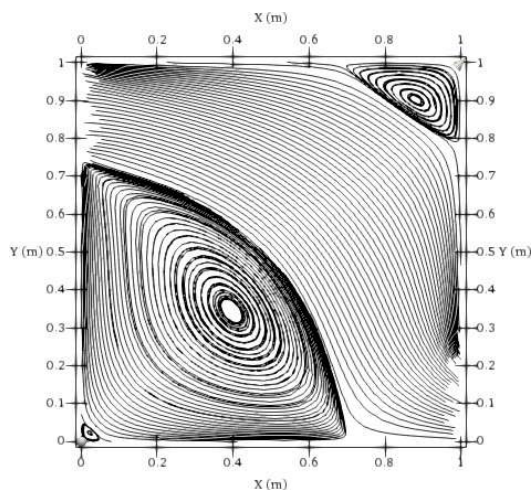


Figura 4: Linhas de corrente no interior da cavidade para $Re = 100$ e $Pr = 3$.

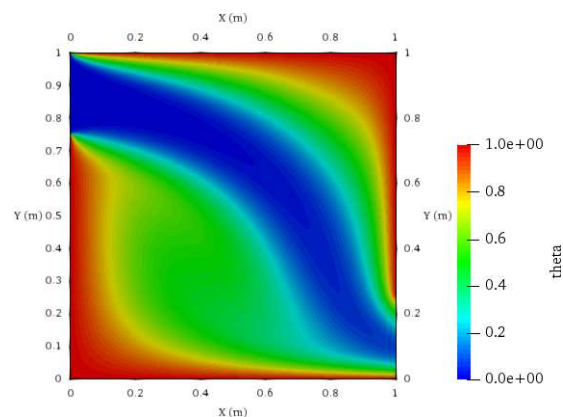


Figura 5: Distribuição de temperatura adimensional θ dentro da cavidade.

Tabela 1: Valores obtidos de Nu_x .

Re	Presente estudo			Mioralli et al. (2017)		
	Pr=0.7	Pr=3	Pr=5	Pr=0.7	Pr=3	Pr=5
50	3.27	5.50	6.43	3.16	5.53	6.65
100	4.35	7.14	8.40	4.23	7.42	9.19
500	8.21	13.45	16.06	8.69	16.00	20.07

As figuras 6 e 7 apresentam os perfis de temperatura e velocidade na posição $X = 0,5$. Na figura 6 é possível observar que a temperatura inicia em $\theta = 1$ na parede inferior, decresce para um valor próximo de $\theta = 0$ na posição $Y \approx 0,7$ e volta a aumentar até $\theta = 1$ no intervalo de $X > 0,8$. Esse perfil reflete o efeito de resfriamento promovido pelo jato no interior da cavidade, contrabalançado pelo aquecimento nas fronteiras.

Na Figura 7 componente horizontal da velocidade, U , possui valores negativo no intervalo de $0 < Y < 0,3$. Destaca-se que na posição próxima de $Y = 0,3$ ocorre uma inflexão no perfil e

valor da velocidade torna-se positivo no trecho de $0,3 < Y < 1$, o que está coerente com a presença da estrutura rotativa no interior da cavidade.

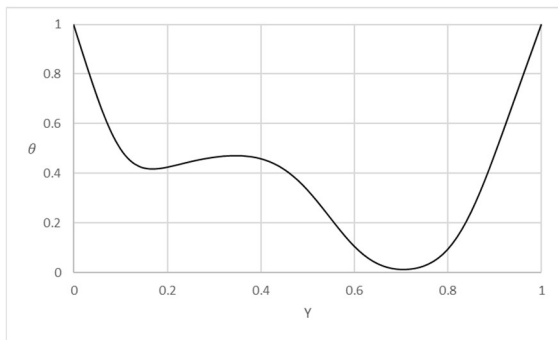


Figura 6: Perfil temperatura na posição $X = 0,5$.

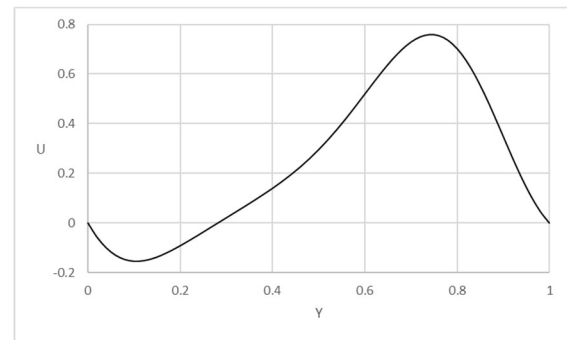


Figura 7: Perfil velocidade horizontal em $X = 0,5$.

As Figuras 8 e 9 ilustram os perfis de temperatura e velocidade vertical na posição $Y = 0,5$, respectivamente. Na Figura 8 observa-se que a temperatura decresce de $\theta = 1$ até aproximadamente $\theta = 0$ no intervalo de $0 < X < 0,8$, seguida ocorre a elevação da temperatura e portanto, θ atinge novamente o valor unitário. Essa distribuição evidencia o efeito de resfriamento promovido pelo jato e a gradual restauração térmica promovida pela parede aquecida oposta.

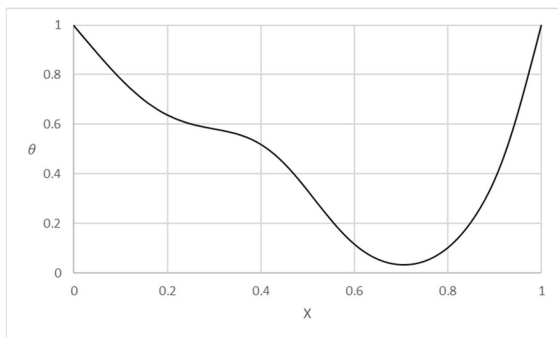


Figura 8: Perfil de temperatura ao longo da linha central horizontal ($Y = 0,5$). O jato resfria a região esquerda enquanto a parede oposta promove reaquecimento.

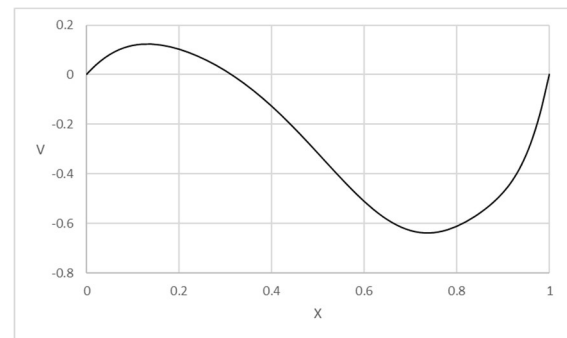


Figura 9: Perfil da velocidade vertical ao longo da linha central horizontal ($Y = 0,5$). Observa-se a intensa movimentação descendente no lado direito devido à recirculação principal.

O perfil de velocidade, Figura 9 apresenta posições máximo e mínimo, sendo que na região próxima à entrada do jato, V é positiva com valor máximo de aproximadamente 0,12.

Posteriormente, é evidenciado valores negativos para essa velocidade atingindo aproximadamente $-0,6$ no intervalo de $0,6 < X < 0,8$. Esse comportamento é consistente com a presença da recirculação no sentido horário observada na Figura 4.

4 CONCLUSÕES

Com base nos resultados apresentados é possível concluir que, o jato constitui o mecanismo importante para promover a convecção mássica do fluido e o resfriamento dele no interior da cavidade, que gera uma grande estrutura de recirculação responsável pela redistribuição de energia térmica e pela redução de temperatura na cavidade. A análise dos campos de velocidade e temperatura indica que o transporte convectivo impulsionado pelo jato predomina sobre a condução, enquanto os vórtices secundários próximos aos cantos da cavidade promovem mistura localizada, evidenciando a complexa interação entre recirculação principal e estruturas vorticosas secundárias na determinação dos perfis térmicos e de fluxo.

Apesar da ação do jato frio, fortes gradientes térmicos persistem próximos às paredes aquecidas, evidenciando a assimetria do campo de temperatura na cavidade. Esses resultados confirmam a importância da convecção induzida pelo jato na redistribuição térmica e na dinâmica do fluxo, reforçando achados de estudos anteriores de Mioralli et al. (2017) e destacando o papel crucial da interação entre recirculação principal e regiões de mistura localizada em cavidades ventiladas.

Por fim, embora o modelo numérico adotado seja bidimensional, os resultados obtidos fornecem informações relevantes para sistemas tridimensionais de ventilação. Eles permitem compreender os mecanismos de recirculação e mistura induzidos por jatos em ambientes confinados, contribuindo para o entendimento físico e o aprimoramento do projeto de sistemas de ventilação forçada.

Agradecimentos. Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio à pesquisa e concessão de bolsas, bem como à Pró-Reitoria de Pós-Graduação (PRPG) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGMEC) pelo suporte institucional e pelas condições fornecidas ao desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

Hussien, A. A., Al-Kouz, W., El Hassan, M., Janvekar, A. A., & Chamkha, A. J. (2021). A review of flow and heat transfer in cavities and their applications. *The European Physical Journal Plus*, 136(4), 353.

- Emesu, P., Chepete, J. H., & Thiipe, E. L. (2025). Computational fluid dynamics assessment of natural ventilation in three types of large-scale broiler poultry houses in Botswana. *Scientific African*, 27, e02587. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2468227625000572>
- Hong, S.-W., Exadaktylos, V., Lee, I.-B., Amon, T., Youssef, A., Norton, T., & Berckmans, D. (2017). Validation of an open source CFD code to simulate natural ventilation for agricultural buildings. *Computers and Electronics in Agriculture*, 138, 80–91. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S016816991630535X>
- Ars, C., Gauthier, J., & Florsch, N. (2021). Underground ancient mine work ventilation modeling. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 37, 102805.
- Awbi, H. B. (2017). Ventilation for Good Indoor Air Quality and Energy Efficiency. *Energy Procedia*, 112, 277–286. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1876610217312237>
- Mioralli, P. C., Scalón, V. L., Avallone, E., & Verdério Jr, S. A. (2017). Analysis of laminar forced convection inside a square ventilated cavity using the OpenFOAM®. *Revista de Engenharia Térmica (RETERM)*, 16(1), 66. <https://revistas.ufpr.br/reterm/article/view/62193>
- Zhang, J. J., Pye, J. D., & Hughes, G. O. (2015). Active Air Flow Control to Reduce Cavity Receiver Heat Loss. In *ASME 2015 9th International Conference on Energy Sustainability* (Vol. 1, V001T05A023). American Society of Mechanical Engineers. <https://asmedigitalcollection.asme.org/ES/proceedings/ES2015/56840/San%20Diego,%20California,%20USA/228248>
- Feng, Y., Wang, B., Wang, C., Li, Y., Han, Y., & Xing, Z. (2025). Performance improvement of thermally stratified storage tank via applying radial perforated inlet structure and dynamic flow control. *Energy Conversion and Management*, 344, 120270.
- Saeidi, S. M., & Khodadadi, J. M. (2006). Forced convection in a square cavity with inlet and outlet ports. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49(11-12), 1896–1906.
- Wang, F., et al. (2012). Design and low energy ventilation solutions for atria in the tropics. *Sustainable Cities and Society*, 2(1), 8–28.
- Priam, S. S., Saha, R., & Saha, S. (2021). Pure mixed convection inside a vented square cavity with an isothermally heated rotating cylinder. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2324, No. 1, 050035). AIP Publishing LLC.
- Liu, Z., Mao, H., & Meng, Q. (2023). Simulation study on how geometric factors influence the flow coefficient of perforated plate. In *Building Simulation 2023* (Vol. 18, pp. 1483–1490). IBPSA.
- Varodompun, J., & Navvab, M. (2007). HVAC Ventilation Strategies: The Contribution for Thermal Comfort, Energy Efficiency, and Indoor Air Quality. *Journal of Green Building*, 2(2), 131–150. <https://jgb.kglmeridian.com/view/journals/jgrb/2/2/article-p131.xml>



METAMODELO DE KRIGAGEM PARA PREDIÇÃO E ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO COLAPSO DE PAINÉIS ENRIJECIDOS

¹ João P. S. Lima

¹ Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Goiás

Estrada Municipal, Qd 04, Fazenda St. Antônio, 74971451, Aparecida de Goiânia, Brasil

joaoplima@ufg.br

DOI: 10.5281/zenodo.19041371

Resumo. Um metamodelo de Krigagem otimizado por hiperparâmetros foi desenvolvido para a estrutura de comportamento de colapso estrutural apresentada neste artigo. A avaliação é conduzida em um painel enrijecido sujeito a carga axial e pressão lateral, típicas da estrutura do convés de um navio graneleiro. Esse comportamento é caracterizado por meio de análise de elementos finitos não lineares para determinar a resposta ao colapso. Os hiperparâmetros do metamodelo foram otimizados por meio de um Algoritmo Genético para atingir o melhor desempenho, e a estrutura treinada pode prever a resistência máxima. Dentro desta abordagem uma avaliação de sensibilidade e importância das variáveis de entrada pode ser elaborada. Os resultados confirmam a aplicabilidade da estrutura substituto de Krigagem para prever a resistência máxima e avaliar a análise de colapso dos painéis enrijecidos de navios graneleiros

Palavras-chave: Metamodelo, Krigagem, Painéis enrijecidos, Método dos Elementos Finitos

1 INTRODUÇÃO

A integridade estrutural dos graneleiros depende do reforço dos painéis que suportam os momentos de flexão gerados por ondas, flutuabilidade e distribuição de carga, especialmente críticos quando o comprimento de onda coincide com o do navio. Nessas condições extremas, podem ocorrer pós-flambagem e colapso no convés e no fundo, exigindo estudos sobre o comportamento dessas estruturas sob cargas axiais e pressão lateral (GASPAR; NAESS; LEIRA; GUEDES SOARES, 2012; SONG; LIU; XU; YANG *et al.*, 2025). O Método dos Elementos

Finitos é amplamente aplicado nessas análises, mas enfrenta desafios devido à sensibilidade a parâmetros de entrada, algoritmos de solução e incertezas relacionadas a materiais, imperfeições e fatores humanos, o que impacta a precisão dos resultados na prática de projeto naval.

Sem dúvida, o Método dos Elementos Finitos (MEF) tem ampla aplicação na análise do comportamento pós-flambagem de painéis enrijecidos. A maioria dos estudos numéricos foi realizada sobre a resistência final de painéis enrijecidos sob cargas axiais e pressão lateral, como FUJIKUBO; HARADA; YAO; REZA KHEDMATI *et al.* (2005) e XU; YANAGIHARA; FUJIKUBO e GUEDES SOARES (2013). No entanto, o software de elementos finitos para lidar com problemas não lineares complexos continua a representar desafios nas práticas de projeto da indústria naval. Isso ocorre principalmente porque os resultados da análise por EF são suscetíveis aos parâmetros de entrada e aos algoritmos de solução utilizados. As incertezas relacionadas aos materiais, imperfeições geométricas e fatores humanos na análise impactam significativamente a precisão dos resultados da análise de EF, sendo necessário ainda garantir um equilíbrio entre precisão computacional e custo (RINGSBERG; DARIE; NAHSHON; SHILLING *et al.*, 2021).

Os metamodelos têm sido amplamente aplicados em projetos para substituir experimentos físicos caros ou simulações demoradas. Para substituir simulações numéricas estruturais, eles são construídos com base em cálculos limitados de elementos finitos, reduzindo a carga computacional e fornecendo previsões baseadas em relações matemáticas ajustadas ou interpoladas. São exemplos de metamodelos os Modelos de regressão polinomial, Modelos de máquina de Vetores de Suporte, Modelos de Expansão de Caos Polinomial, Processos Gaussianos e Redes Neurais Artificiais (LIMA; EVANGELISTA; GUEDES SOARES, 2023a; b).

Assim, o presente artigo tem como objetivo propor o desenvolvimento de um metamodelo de Krigagem otimizado por hiperparâmetros, considerando as vantagens do Algoritmo Genético (AG), com foco na precisão da predição, estabilidade e eficiência computacional aplicadas em um problema típico da indústria naval. Como uma estrutura numérica, um painel enrijecido sob carga axial e pressão lateral típico da estrutura do convés de navios modelo de graneleiros é adotado e descrito usando análise de EF não linear para obter o comportamento de colapso. O metamodelo de Krigagem é usado para prever a resistência máxima.

2 RESISTÊNCIA MÁXIMA DO PAINEL REFORÇADO SOB CARGA COMBINADA

Esta seção apresenta o modelo estrutural dos painéis enrijecidos do fundo do navio graneleiro sob uma carga combinada considerando compressão axial associada à pressão lateral e descreve o modelo de elementos finitos utilizado para sua reprodução e análise estrutural. Este

estudo examina o efeito da geometria, deflexão inicial e condição de contorno na tensão última (σ_{zu}) do painel.

2.1 Estudo de caso: Painéis enrijecidos de navios graneleiros

As dimensões dos painéis reforçados baseiam-se nos parâmetros de referência estabelecidos no Comitê III.1 do ISSC (2012), levando em consideração os elementos do navio real. Para a análise de parâmetros de referência, foram selecionados modelos fundamentais, especificamente painéis reforçados do revestimento inferior de um graneleiro. Esses painéis apresentam dois reforços e são submetidos simultaneamente à pressão lateral e à compressão no painel.

Para este estudo, o painel local tem uma relação de aspecto de $a/b = 3$ ($a \times b = 2550 \times 850$ mm). O tipo de enrijecedor escolhido é do tipo T. Os valores de referência em ISSC (2012) estão associados a TANAKA; YANAGIHARA; YASUOKA; HARADA *et al.* (2014) e XU; YANAGIHARA; FUJIKUBO e GUEDES SOARES (2013) para determinar as faixas de variáveis no presente estudo. A Figura 1 exibe as geometrias dos reforços, e a Tabela 1 oferece uma visão geral detalhada dos diversos parâmetros geométricos da placa reforçada. O material é considerado elástico e perfeitamente plástico. O aço considerado nas análises apresenta tensão de escoamento de $\sigma_Y = 313,6$ MPa, módulo de Elasticidade $E = 205,8$ GPa e coeficiente de Poisson de $\nu = 0,3$.

A placa enrijecida é selecionada como simetria (1/2+1+1/2) com condição de contorno periódica adotadas considerando a interação entre os enrijecimentos adjacentes e a influência das placas. Os detalhes das imperfeições iniciais, condições de contorno e simetria utilizadas no presente estudo podem ser observados em TANAKA; YANAGIHARA; YASUOKA; HARADA *et al.* (2014) e XU; YANAGIHARA; FUJIKUBO e GUEDES SOARES (2013).

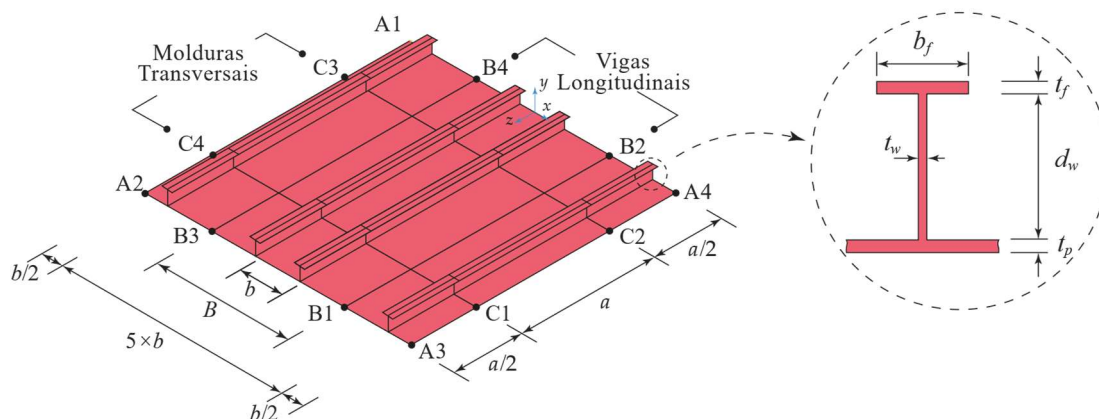


Figura 1. Detalhes do painel enrijecido do fundo do navio graneleiro.

Tabela 1. Descrição das variáveis geométricas básicas do painel reforçado.

Variável	Unidade	Descrição	Limite inferior	Limite superior
t_p	mm	Espessura da placa	8.0	30.0
d_w	mm	Altura do enrijecedor	100.0	400.0
t_f	mm	Espessura da alma	8.0	20.0
b_f	mm	Altura da alma	80.0	200.0
t_w	mm	Espessura do enrijecedor	8.0	16.0

O comportamento pós-flambagem do painel enrijecido sob compressão uniaxial é obtido utilizando o software de elementos finitos ABAQUS v.14. O elemento finito S4R, disponível no código de elementos finitos do ABAQUS, é utilizado para obter o comportamento estrutural não linear dos elementos de placa enrijecidos sob carregamento combinado. O elemento S4R é um elemento de casca quadrilátero de uso geral com 4 nós que utiliza integração reduzida e acomoda a formulação de grandes deformações no ABAQUS. Com base no estudo de convergência para um painel enrijecido intacto, estabelecemos que o tamanho do elemento da malha deve ser definido em 50 mm. As deflexões iniciais são introduzidas na malha ajustando as coordenadas dos nós do modelo resultando em uma malha modificada.

A pressão lateral e as forças no plano são aplicadas em duas etapas. Primeiro, a pressão é aplicada na direção lateral da placa, seguida pelo deslocamento forçado aplicado ao longo da borda do painel reforçado (XU; YANAGIHARA; FUJIKUBO; GUEDES SOARES, 2013).

3 METAMODELO DE KRIGAGEM PARA ANÁLISE DE COLAPSO ESTRUTURAL

O modelo de Krigagem foi introduzido na geoestatística por Krige em 1951 (KRIGE, 1951). Trata-se de um metamodelo baseado em interpolação que aproxima a função de entrada/saída f . O metamodelo de Krigagem é assumido em um modelo probabilístico não paramétrico para prever valores de resposta em pontos desconhecidos com base em um conjunto de dados de entrada de amostra $\mathbf{X} = \{\mathbf{x}^{(1)}, \dots, \mathbf{x}^{(n)}\}^T$ e os valores observados $\mathbf{Y} = \{y^{(1)}, \dots, y^{(n)}\}^T$. De acordo com FORRESTER e SÓBESTER (2007) considerando $\mathbf{x}$ como variáveis de projeto em uma dimensão D^k a formulação da Krigagem pode ser apresentada da seguinte forma:

$$\hat{f}(\mathbf{x}) = G(\mathbf{x})^T \boldsymbol{\eta} + Z(\mathbf{x}) \quad (1)$$

onde $\hat{f}(x)$ é a aproximação por Krigagem, $G(x)^T$ é o vetor da função base, η são os coeficientes de regressão desconhecidos da função de tendência e $Z(\cdot)$ é o modelo de erro de processo gaussiano estacionário, que possui incerteza zero nos pontos de treinamento. A matriz de covariância $Z(\cdot)$ é modelada utilizando a matriz de correlação:

$$\text{cov}[Z(x^{(i)}), Z(x^{(j)})] = \sigma^2 \psi(x^{(i)}, x^{(j)}) \quad (2)$$

onde σ^2 é a variância, e $\psi(\cdot)$ são as correlações entre as variáveis aleatórias em um determinado ponto a ser predito e à uma amostra de pontos:

$$\psi(x^{(i)}, x^{(j)}) = \exp\left(-\sum_{k=1}^{n_v} \hat{\theta}_k \|x_k^{(i)} - x_k^{(j)}\|^{\hat{p}_k}\right) \quad (3)$$

onde n_v é o número de variáveis de projeto e $\hat{\theta}$ e $\hat{p}_k$ são hiperparâmetros.

O hiperparâmetro, p_j , pode ser entendido como responsável por determinar a suavidade da aproximação da função. Em muitas situações, podemos assumir que não haverá descontinuidades e usar $p_k = 2$ em vez de um estimador de máxima verossimilhança (MLE). Isso significa que a função de base é infinitamente diferenciável em um ponto amostral quando $\|x^{(n+1)} - x^{(i)}\| = 0$ e que a função assume a mesma forma de uma distribuição Gaussiana com variância $\frac{1}{\hat{\theta}_j}$. Assim, $\hat{\theta}$ pode ser interpretado como a medida de quão rapidamente a função muda à medida que $x^{(n+1)}$ se afasta de $x^{(i)}$, sendo que valores altos e baixos de $\hat{\theta}_j$ indicam, respectivamente, uma função ativa ou inativa ao longo da dimensão j . Os hiperparâmetros $\hat{\theta}$ são obtidos maximizando a verossimilhança. A otimização por Algoritmos Genéticos (AG) (FORRESTER; SÓBESTER; KEANE, 2007) é adotada para estimar os hiperparâmetros e maximizar a estimativa de verossimilhança. A predição por Krigagem é obtida como o valor em $x^{(n+1)}$ que maximiza a verossimilhança, dados os dados amostrais e os estimadores de máxima verossimilhança dos hiperparâmetros, e é dada por:

$$\hat{y}(x^{(n+1)}) = \hat{\mu} + \sum_{i=1}^n b^{(i)} \psi^{(i)}(x^{(n+1)}, x^{(i)}). \quad (4)$$

As constantes b_i são obtidas pelo vetor $\mathbf{b} = \Psi^{-1}(\mathbf{y} - \mathbf{1}\hat{\mu})$, onde Ψ é a $n \times n$ matriz de correlação entre os dados amostrais, $\mathbf{y}$ é a coluna de vetores de respostas $\{y(x^{(1)}), \dots, y(x^{(n)})\}^T$, e a estimativa de máxima verossimilhança $\hat{\mu} = \mathbf{1}^T \Psi^{-1} \mathbf{y} / \mathbf{1}^T \Psi^{-1} \mathbf{1}$. Um detalhamento matemático completo da Krigagem pode ser observado em FORRESTER e SÓBESTER (2007).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O presente capítulo apresenta e discute os principais resultados obtidos ao longo do estudo. Inicialmente, é realizada a validação do modelo de elementos finitos, assegurando a confiabilidade da abordagem numérica adotada. Em seguida, avalia-se o desempenho do metamodelo de Krigagem na estimativa da tensão última (σ_{zu}) de painéis enrijecidos submetidos à compressão axial combinada com pressão lateral. Essa etapa permite comparar a resposta do metamodelo com os resultados de referência, destacando sua capacidade de representação e seu potencial como ferramenta de apoio ao projeto e análise estrutural.

4.1 Validação do Modelo de EF

O caso de validação é baseado no estudo experimental conduzido por ESTEFEN; CHUJUTALLI e GUEDES SOARES (2016). Em sua pesquisa, os autores analisam um painel enrijecido com sete enrijecedores longitudinais idênticos, escalonados na proporção de 1:20, que se assemelha a um painel típico encontrado em um petroleiro Suezmax. Os detalhes de geometria e material podem ser consultados na referência.

O estudo experimental original referenciado mapeou as magnitudes e distribuições das imperfeições geométricas iniciais dos painéis enrijecidos usando equipamento de medição portátil. As condições de contorno para o caso experimental podem ser observadas no arquivo de referência. Uma malha convergente com comprimento $l = 2$ mm é adotada. O deslocamento axial e a distribuição de força axial do experimental, apresentado pelos autores, e a análise numérica conduzida neste estudo são mostradas na Figura 2a. Finalmente, a distribuição final de tensão de von Mises do painel enrijecido pós-colapso é ilustrada na Figura 2b.

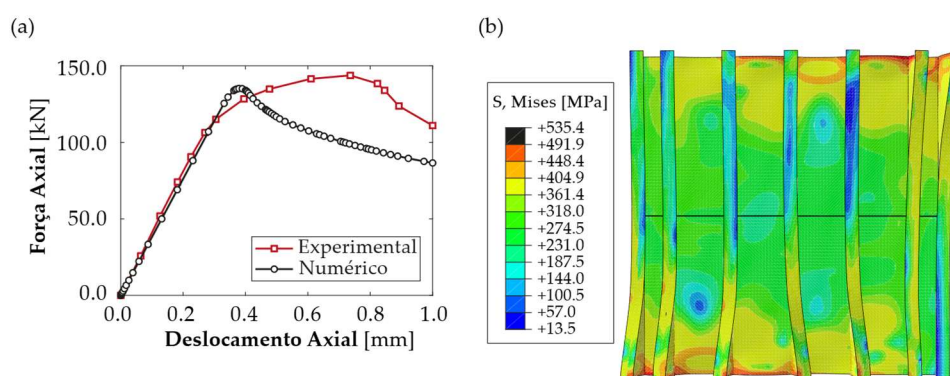


Figura 2. Comportamento de flambagem do modelo de validação.

Os resultados apresentados na Figura 2a indicam que o painel enrijecido da análise experimental demonstra maior resistência por deformação em uma faixa mais ampla em comparação com a análise numérica neste estudo. Notavelmente, os valores de carga de flambagem final são 143,77 kN para o caso experimental e 135,22 kN para o caso numérico, resultando em um Erro Relativo Médio (MRE) de 5,94%. Essas descobertas são consistentes com os objetivos propostos. Além disso, semelhanças na deformação final podem ser observadas comparando os resultados experimentais na referência dos autores com o presente estudo (Figura 2b). Além disso, a referência fornece uma análise numérica que considera o mapeamento das imperfeições iniciais, resultando em uma carga de flambagem final de 136,08 kN, o que mostra um MRE de 0,63% quando comparado aos achados do presente estudo.

4.2 Construção do metamodelo de krigagem

Esta seção examina o desempenho do metamodelo de Krigagem proposto na previsão do σ_{zu} de painéis enrijecidos submetidos a carregamentos combinados com base em resultados de elementos finitos (EF). A precisão da previsão de σ_{zu} é diretamente influenciada pelo número de pontos de suporte n_{train} associados aos hiperparâmetros otimizados do metamodelo de Krigagem.

Inicialmente, os pontos de treinamento são definidos como $n_{train} = 100$, e esse valor será aumentado incrementalmente em 100 pontos de suporte, conforme necessário, até que o critério de parada de uma MRE de 1% para o metamodelo seja alcançado. Para cada análise, o melhor metamodelo de Krigagem é identificado aplicando AG para ajustar e otimizar os hiperparâmetros usando os dados de treinamento. Os limites inferior e superior para os hiperparâmetros substitutos, denotados como θ , são definidos no intervalo $[10^{-3}, 10^3]$. Para avaliar a precisão do metamodelo, um total de pontos de teste é fixado em $n_{test} = 200$.

Uma análise de sensibilidade é conduzida para determinar os parâmetros de AG usados para estimar os hiperparâmetros de cada metamodelo. O critério para selecionar os melhores parâmetros de AG é o número total de chamadas (N_{call}) necessárias para atender aos critérios de parada.

A Tabela 1 apresenta os resultados da análise de sensibilidade referente aos parâmetros de AG para os diferentes modelos substitutos.

Tabela 1. Parâmetros do AG selecionados para os diferentes metamodelos

n_{train}	Tamanho população	Fração Elite (%)	Fração de cruzamento	Função Objetivo (MLE)	Tempo Comp. (seg)	Gerações	N_{call}
100	100	5	0.7	282.4	47	86	8275
200	100	5	0.6	583.3	162	82	7895
300	100	5	0.7	894.0	514	97	9320
400	200	5	0.8	1295	6981	81	15600
500	200	5	0.8	1561.1	11271	94	18070

O MRE e a precisão considerando D_{test} no metamodelo de Krigagem para prever σ_{zu} são representados na Figura 3. O metamodelo de Krigagem inicialmente não atingiu a precisão desejada com o número especificado de pontos de suporte $n_{train} = 100$, resultando em um MRE de 2,1%. Pontos de suporte adicionais são incrementados ao conjunto de dados de treinamento até que o modelo atenda ao critério de parada de um MRE de 1%. Foram necessárias quatro iterações para atingir esse objetivo, resultando em $n_{train} = 500$ amostras e um MRE de 0,82%.

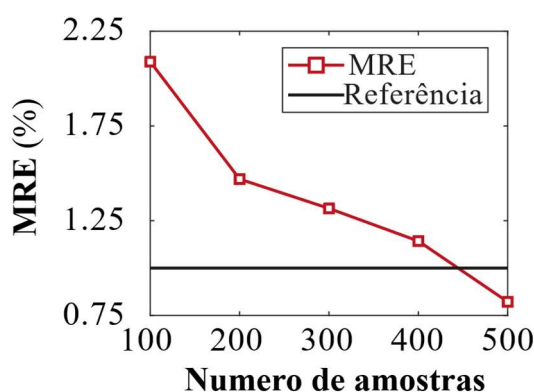


Figura 3. Tendência do MRE do metamodelo de Krigagem.

A Figura 4(a) compara as previsões numéricas de σ_{zu} e σ_{zu}^* feitas por Krigagem usando o conjunto de dados D_{test} . As previsões de D_{test} alinham-se estreitamente com a linha de referência, resultando em um alto coeficiente de correlação de $R^2 = 0,9954$. A Figura 4(b) ilustra o erro relativo de σ_{zu} para cada amostra de D_{test} . Como mostrado na Figura XX, os erros relativos máximo e médio para todas as amostras de teste são 7,62% e 0,82%, respectivamente. Assim, o metamodelo de

Krigagem demonstra um nível adequado de precisão na previsão de σ_{zu} dos painéis enrijecidos. Além disso, a Figura 4(b) indica que 91,5% das amostras de D_{test} apresentam um erro relativo inferior a 2%.

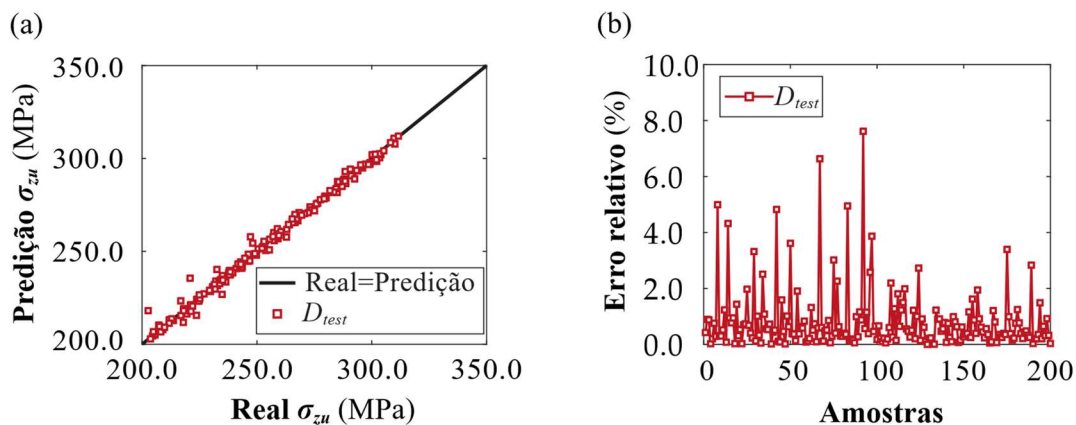


Figura 4. Aproximação de σ_{zu} : (a) usando metamodelo de Krigagem; e (b) Erro relativo de σ_{zu} .

4.3 Estimativa dos hiperparâmetros da krigagem

No contexto de um problema não linear de alta dimensão, visualizar o cenário de projeto e compreender os efeitos de diversas variáveis pode ser bastante desafiador. O vetor θ usado na construção do metamodelo de Krigagem não captura completamente as interações entre as variáveis. No entanto, a análise dos componentes de θ possibilita identificar as variáveis mais significativas e, potencialmente, eliminar as menos importantes de futuros esforços de otimização.

1. A Figura 5 exibe os hiperparâmetros θ obtidos para o metamodelo de Krigagem.

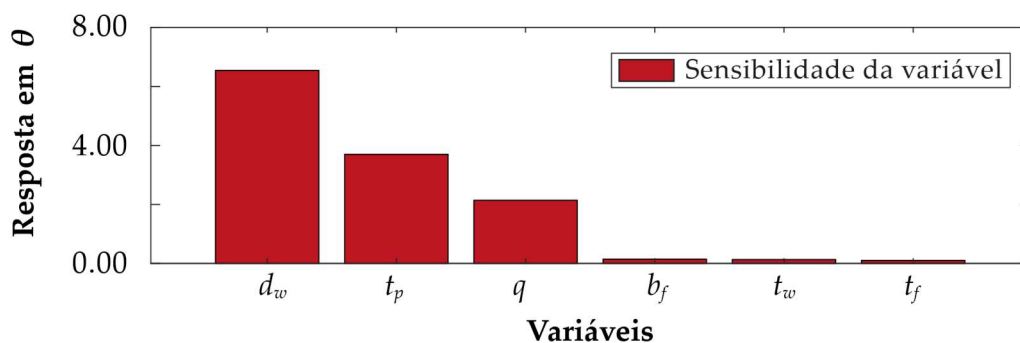


Figura 5. Classificação de importância das variáveis obtida pelos hiperparâmetros de Krigagem.

Esta pesquisa investiga a sensibilidade de painéis enrijecidos, examinando como variações nos parâmetros fundamentais de projeto impactam seu comportamento e colapso sob cargas

combinadas em diversas condições. O modelo de painel enrijecido concentra-se explicitamente em como fatores incertos — irregularidades geométricas e cargas ambientais — afetam o desempenho estrutural.

A classificação das variáveis fornecida pelo metamodelo de Krigagem (Figura 13) indica que tanto as variáveis geométricas quanto as de carga ambiental influenciam significativamente o comportamento de σ_{zu} dos painéis enrijecidos. Entre os fatores considerados, os parâmetros altura da alma (d_w) e espessura da chapa (t_p) (ver Figura 1(b)) são os mais críticos para a previsão de σ_{zu} . Além disso, a carga lateral (q) aplicada ao painel enrijecido desempenha um papel substancial na estimativa de σ_{zu} , particularmente devido à sua relação com as imperfeições iniciais que afetam a deformação da forma do painel. Outras variáveis geométricas, denominadas b_f , t_w e t_f , têm menor importância em relação às variáveis selecionadas.

5 CONCLUSÕES

Este estudo explorou o potencial de metamodelos de Krigagem para prever a resistência final de painéis enrijecidos sujeitos a cargas compressivas e pressão lateral, em contexto de comportamento altamente não linear. Os resultados indicam que a Krigagem se aplica à análise de colapso de painéis enrijecidos, fornecendo precisão aceitável. Trabalhos futuros podem validar comparativamente com outros modelos substitutos para evidenciar a excelência do método.

No entanto, é importante destacar que esforços futuros devem se concentrar em compreender como os painéis enrijecidos se comportam sob cargas biaxiais e condições de cisalhamento, particularmente no que diz respeito à previsibilidade do metamodelo. Além disso, pesquisas sobre incertezas dos materiais devem ser vinculadas a variáveis geométricas para avaliar a eficácia do metamodelo. Também é crucial avaliar a universalidade do modelo, aplicando-o a vários tipos de vasos e a novas configurações de painéis reforçados sob diferentes cenários de carregamento em estudos futuros.

Após a otimização dos hiperparâmetros, o metamodelo foi treinado em várias combinações de amostras. Avaliações de acurácia definiram a configuração mais representativa do colapso. A classificação da importância das variáveis de projeto, obtida com o metamodelo otimizado, permitiu investigar a relevância das variáveis selecionadas na resposta do modelo.

REFERÊNCIAS

- ESTEFEN, S. F.; CHUJUTALLI, J. H.; GUEDES SOARES, C. Influence of geometric imperfections on the ultimate strength of the double bottom of a Suezmax tanker. *Engineering Structures*, 127, p. 287-303, 2016.
- FORRESTER, A. I.; SÓBSTER, A. K., A. J. Multi-fidelity optimization via surrogate modelling. *Proceedings of the*

royal society of london A: mathematical physical and engineering sciences, 463, p. 3251-3269, 2007.

FORRESTER, A. I. J.; SÓBESTER, A.; KEANE, A. J. Multi-fidelity optimization via surrogate modelling. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 463, n. 2088, p. 3251-3269, 2007.

FUJIKUBO, M.; HARADA, M.; YAO, T.; REZA KHEDMATI, M. et al. Estimation of ultimate strength of continuous stiffened panel under combined transverse thrust and lateral pressure Part 2: Continuous stiffened panel. Marine Structures, 18, n. 5-6, p. 411-427, 2005.

GASPAR, B.; NAESS, A.; LEIRA, B. J.; GUEDES SOARES, C. System reliability analysis of a stiffened panel under combined uniaxial compression and lateral pressure loads. Structural Safety, 39, p. 30-43, 2012.

ISSC, 2012, Rostock, Germany. Report of Specialist Committee III.1 Ultimate Strength. 285-364.

KRIGE, D. G. A Statistical Approaches to Some Basic Mine Valuation Problems on the Witwatersrand. Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society of South Africa, 52, p. 119-139, 1951.

LIMA, J. P. S.; EVANGELISTA, F.; GUEDES SOARES, C. Bi-fidelity Kriging model for reliability analysis of the ultimate strength of stiffened panels. Marine Structures, 91, p. 103464, 2023/09/01/ 2023a.

LIMA, J. P. S.; EVANGELISTA, F.; GUEDES SOARES, C. Hyperparameter-optimized multi-fidelity deep neural network model associated with subset simulation for structural reliability analysis. Reliability Engineering & System Safety, 239, p. 109492, 2023/11/01/ 2023b.

RINGSBERG, J. W.; DARIE, I.; NAHSHON, K.; SHILLING, G. et al. The ISSC 2022 committee III.1-Ultimate strength benchmark study on the ultimate limit state analysis of a stiffened plate structure subjected to uniaxial compressive loads. Marine Structures, 79, p. 103026, 2021/09/01/ 2021.

SONG, Z. J.; LIU, Q. C.; XU, R. J.; YANG, X. et al. Ultimate strength attenuation behaviours of stiffened panels under cyclic extreme loads based on test and numerical simulations. Ocean Engineering, 321, p. 120447, 2025/03/30/ 2025.

TANAKA, S.; YANAGIHARA, D.; YASUOKA, A.; HARADA, M. et al. Evaluation of ultimate strength of stiffened panels under longitudinal thrust. Marine Structures, 36, p. 21-50, 2014.

XU, M. C.; YANAGIHARA, D.; FUJIKUBO, M.; GUEDES SOARES, C. Influence of boundary conditions on the collapse behaviour of stiffened panels under combined loads. Marine Structures, 34, p. 205-225, 2013.



MODELAGEM MATEMÁTICA DE FONTES DE CALOR EM PROCESSOS DE SOLDAGEM: UMA REVISÃO COMPARATIVA ENTRE ROSENTHAL, MODELOS GAUSSIANOS E GOLDAK

^{1,2} Nilton C. Pereira, ¹ Felipe P. Mariano, ² Demostenes Ferreira Filho

¹ Laboratório de Engenharia Térmica e de Fluidos (LATEF), Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC), Universidade Federal de Goiás (UFG)

Av. Esperança, Campus Samambaia, Al. Ingá, Prédio B5, 74.690-900 – Goiânia/Goiás, Brasil.

² Laboratório de Materiais e Fabricação (LAMAF), Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC), Universidade Federal de Goiás (UFG)

Av. Esperança, Campus Samambaia, Al. Ingá, Prédio B5, CEP: 74.690-900 – Goiânia/Goiás, Brasil.

fpmariano@ufg.br, demostenesferreira@ufg.br

DOI: 10.5281/zenodo.19041386

Resumo. A modelagem numérica do processo de soldagem é uma ferramenta essencial para prever tensões residuais, distorções e a microestrutura final de junta soldada. A precisão dessas simulações depende do modelo de fonte de calor. Este artigo apresenta uma revisão bibliográfica sobre os principais modelos matemáticos utilizados para a simulação da distribuição de temperatura em processos de soldagem. São discutidas as formulações clássicas de Rosenthal, os modelos gaussianos superficiais e volumétricos e o modelo de Goldak, em sua forma de dupla elipsoide e extensões recentes. São abordadas as diferenças conceituais, expressões matemáticas, hipóteses adotadas e aplicações práticas de cada modelo, bem como técnicas de calibração experimental. A revisão evidencia que, embora o modelo de Rosenthal seja útil em análises analíticas simplificadas (Rosenthal, 1946), os modelos gaussianos e principalmente o de Goldak oferecem maior realismo em simulações numéricas tridimensionais (Zuo et al., 2020). Trabalhos recentes demonstram ainda o uso de métodos baseados em inteligência artificial e estatística bayesiana (Cheng, 2024; Ertugrul, 2025). para ajuste automático dos parâmetros do modelo de Goldak. Conclui-se que a integração de modelos matemáticos consolidados com métodos modernos de calibração representa a tendência atual das pesquisas na área, sendo o modelo de

Goldak o mais utilizado e preciso para simulações termomecânicas detalhadas em cenários industriais e de pesquisa.

Palavras-chave: Simulação Computacional de Soldagem, Fonte de Goldak, Fonte Gaussiana, Fonte de Rosenthal.

1 INTRODUÇÃO

A modelagem matemática da transferência de calor em processos de soldagem e manufatura aditiva tem se tornado essencial para prever o campo térmico (Zuo et al., 2020), reduzir custos experimentais e otimizar parâmetros de processo (Nain et al., 2021). Diversos modelos foram propostos ao longo das últimas décadas, destacando-se os de Rosenthal, os gaussianos e o de Goldak (Rosenthal, 1946; Glodak et al., 1984). Cada modelo apresenta hipóteses próprias, diferentes níveis de simplificação e aplicações específicas.

Este artigo tem como objetivo revisar os principais modelos de fonte de calor, apresentar suas formulações matemáticas, discutir suas limitações e destacar avanços nos últimos anos (2020-2025) em formulação, calibração experimental, técnicas de ajuste de parâmetros (incluindo aprendizado de máquina), aplicações em WAAM / L-PBF, suas limitações e recomendações práticas, com base em artigos revisados por pares.

2 DESENVOLVIMENTO

A simulação numérica de processos de soldagem e manufatura aditiva depende da representação da fonte de calor. O modelo adequado deve refletir, com boa aproximação, a distribuição espacial de energia e os mecanismos de transferência de calor que ocorrem durante a fusão do material. Desde os trabalhos pioneiros de Rosenthal, que introduziram soluções analíticas simplificadas baseadas em fontes pontuais ou lineares, houve evolução para modelos gaussianos e, posteriormente, para distribuições volumétricas mais sofisticadas (Zuo et al., 2020; Nain et al., 2021). Entre estes, o modelo de Goldak se tornou padrão em estudos computacionais devido à flexibilidade e boa correlação com resultados experimentais (Goldak et al., 1984; Zuo et al., 2020).

2.1 Modelos Clássicos de Fontes de Calor

Os modelos de fontes de calor podem ser classificados em superficiais e volumétricos. O Modelo Pontual de Rosenthal et al. (1946) assume uma fonte idealizada de calor pontual ou linear,

útil para análises preliminares, mas incapaz de reproduzir perfis realistas de poça, é dado pela equação:

$$T_{(x,y,z)} = T_0 + \frac{q}{2\pi kr} \exp\left(\frac{-v(x-x_0)}{2\alpha}\right) \quad (1)$$

onde:

- $T_0 \Rightarrow$ temperatura inicial do material,
- $q \Rightarrow$ potência térmica da fonte,
- $k \Rightarrow$ condutividade térmica,
- $r = \sqrt{(x - x_0)^2 + y^2 + z^2} \Rightarrow$ distância à fonte,
- $v \Rightarrow$ velocidade de soldagem,
- $\alpha = k/\rho c_p \Rightarrow$ difusividade térmica.

O modelo de Rosenthal, mostrado na Figura 1 em uma representação com eixos normalizados e intensidade térmica em escala arbitrária para ilustrar seu caráter conceitual, constitui a formulação analítica mais clássica para a soldagem, baseado na solução da equação de condução de calor com uma fonte móvel em regime quase-estacionário. propriedades dos materiais e superestima significativamente as temperaturas próximas à fonte.

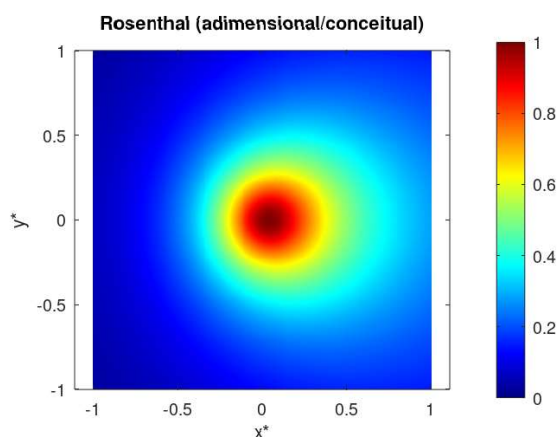


Figura 1. Modelo de Rosenthal (AUTORES, 2025)

Embora não seja um modelo de fonte distribuída como os outros, o modelo de Rosenthal é a pedra fundamental da análise térmica em soldagem. Os parâmetros a serem calibrados são as propriedades do material (α, k) e os de processo (q, v). É uma solução analítica de baixo custo computacional, ideal para estimativas rápidas de taxa de resfriamento e largura da Zona Termicamente Afetada (ZTA) e excelente para fins didáticos e validação inicial de modelos

numéricos, no entanto, como desvantagens não considera a distribuição real de calor, sendo uma fonte pontual; ignora a geometria da peça (cantos, bordas), despreza a mudança de fase e a dependência da temperatura das

O Modelo Gaussiano Superficial, mostrado na Figura 2 ilustra de forma conceitual o decaimento da densidade de energia a partir do centro da fonte, descreve a densidade de fluxo térmico sobre a superfície do material por uma distribuição gaussiana; sendo mais adequado para processos laser e de alta concentração de energia. É definido por:

$$q_{(x,y)} = \frac{3\eta P}{\pi r^2} \exp\left(\frac{-3r^2}{r_0^2}\right) \quad (2)$$

onde:

- η => eficiência térmica do processo,
- P => potência da fonte (W),
- $r^2 = (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2$ => distância à fonte,
- r_0^2 => raio efetivo da fonte.

Foi um dos primeiros modelos de fonte distribuída aplicado com o Método dos Elementos Finitos (MEF), representando o arco como um disco de calor na superfície da peça. Os parâmetros-chave são a eficiência térmica (η), o raio do arco (r) e a potência de soldagem ($P = UI$). A calibração é feita ajustando η e r para que a poça de fusão simulada corresponda à observada experimentalmente. É mais realista que o modelo de Rosenthal (Zuo et al., 2020; Nain et al., 2021), simples de implementar em códigos de MEF e tem custo computacional moderado (Zuo et al., 2020); mas assume uma distribuição de calor simétrica e superficial, não capturando a penetração do arco (Nain et al., 2021), sendo inadequado para processos de soldagem com alta penetração, como feixe de elétrons ou soldagem de aços de alta espessura.

Modelos superficiais como o Gaussiano se mostram inadequados para processos de soldagem com penetração significativa desde o início, como soldagem a laser ou feixe de elétrons, sendo necessário utilizar modelos de fonte volumétrica que distribuam o calor ao longo da profundidade da peça. Assim, o Modelo de Fonte Gaussiana Volumétrica Zuo et al. (2020) distribui o calor em um volume com perfil decrescente exponencial ou gaussiano, simulando parcialmente a penetração da fonte, diferentemente da Fonte Uniforme Volumétrica Zuo et al. (2020) que considera a energia distribuída de forma homogênea no volume, sendo de aplicação limitada. São definidos pelas equações (3) e (4) respectivamente:

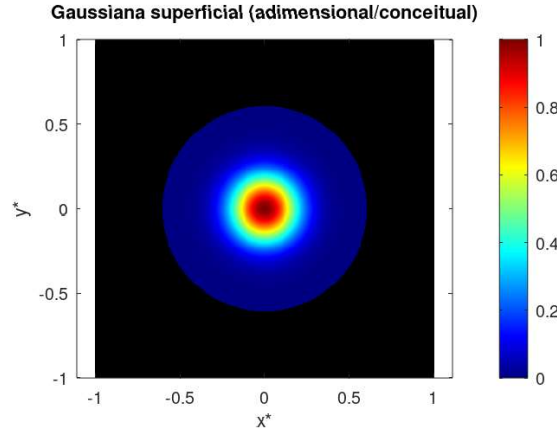


Figura 2. Fonte Gaussiana Superficial (AUTORES, 2025)

$$q(x,y,z) = \frac{6\sqrt{3}\eta P}{\pi^{3/2}r_x r_y r_z} \exp\left(-3\left[\left(\frac{x}{r_x}\right)^2 + \left(\frac{y}{r_y}\right)^2 + \left(\frac{z}{r_z}\right)^2\right]\right) \quad (3)$$

$$q_v = \frac{\eta P}{V} \quad (4)$$

onde:

- $V \Rightarrow$ volume da região de aquecimento,
- r_x, r_y e $r_z \Rightarrow$ semi-eixos característicos da distribuição gaussiana.

A Fonte Volumétrica Gaussiana, representado na Figura 3 (esquerda) mostra o decaimento da intensidade, tem como parâmetros críticos a eficiência de absorção (η), os raios e a profundidade. A calibração é complexa e requer a combinação de dados experimentais com simulação inversa para ajustar esses parâmetros até que a geometria da zona fundida simulada coincida com a real. Representa com alta-fidelidade o perfil térmico de processos a laser (Zuo et al., 2020) e feixe de elétrons, captura o afunilamento característico da penetração, mas tem um número elevado de parâmetros para calibrar com custo computacional muito alto devido à natureza 3D da função de distribuição e assume um perfil de intensidade Gaussiano em todo o volume, o que pode não ser perfeito.

A Fonte Volumétrica Uniforme, Figura 3 (direita), por ser um modelo mais simplificado, os parâmetros são puramente geométricos, ou seja, raio R, ou largura W e comprimento L, e altura h. A calibração envolve ajustar essas dimensões para que o volume da zona fundida simulada corresponda ao experimental. É simples de implementar e compreender com custo computacional mais baixo que o modelo Gaussiano Volumétrico, pois a função é

constante. Pode ser uma boa aproximação inicial para processos com penetração uniforme, no entanto, não é fisicamente realista, pois a densidade de energia em um feixe de soldagem nunca é perfeitamente uniforme e gera gradientes de temperatura não suaves nas bordas da fonte, o que pode introduzir imprecisões numéricas; além de superestimar a temperatura nas bordas e subestimar no centro, comparado a uma distribuição Gaussiana.

Já o modelo de Goldak et al. (1984), também conhecido como “double-ellipsoidal heat source”, representado na Figura 4 para evidenciar sua assimetria característica, em essência, é um modelo matemático de distribuição de calor sendo uma formulação analítica/fenomenológica volumétrica para representar o aporte térmico móvel em processos de soldagem por arco, que foi concebido para reproduzir a geometria assimétrica típica de poças de fusão em processos de arco e é largamente adotado como termo-fonte em simulações térmicas transientes de soldagem.

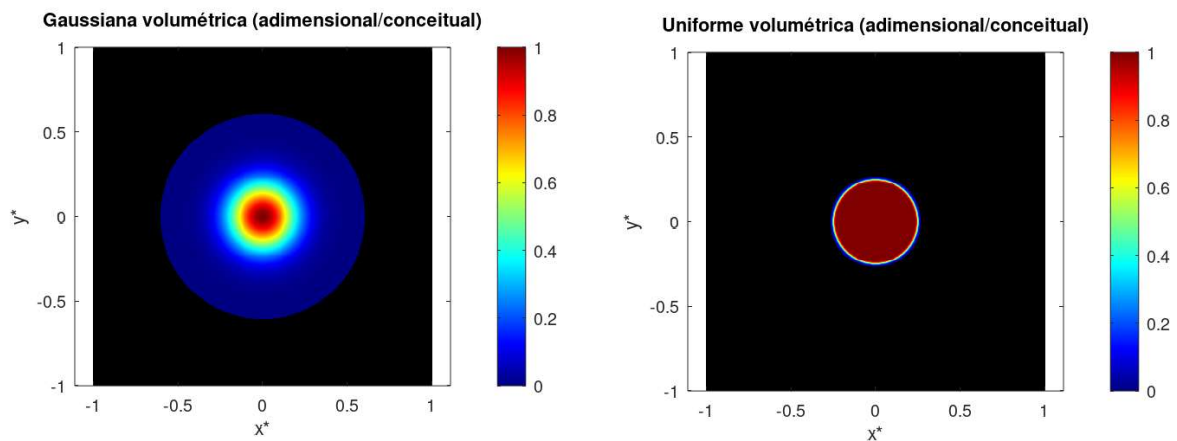


Figura 3. Fontes Gaussiana Volumétrica (esquerda) e Uniforme Volumétrica (direita) (AUTORES, 2025)

Ele descreve a forma do arco elétrico (ou do aporte térmico) através de funções analíticas que dividem a poça de fusão em duas semi-elipses, sendo uma na frente do arco (fonte frontal), e outra atrás do arco (fonte traseira). Essas semi-elipses são definidas por equações matemáticas que controlam a intensidade e a distribuição espacial do fluxo de calor, em função de parâmetros como profundidade, largura e comprimento da poça. É usado numericamente como condição de contorno ou termo fonte dentro de simulações computacionais (FEM/FVM), e em técnicas modernas de calibração (incluindo aprendizado de máquina) e aplicações recentes em manufatura aditiva (WAAM / L-PBF).

As conclusões apontam avanços importantes em calibração automática e extensões do modelo para processos a laser, mas ressaltam limitações inerentes quando efeitos microfluidicos

da poça ou multi-escala são relevantes. Estudos comparativos recentes Zuo et al. (2020) e Nain et al. (2021) indicam que, embora modelos gaussianos sejam eficazes em soldagem laser superficial, o modelo de Goldak apresenta melhor desempenho em soldagem por arco, devido à possibilidade de calibrar diferentes frações de energia para frente e para trás da poça de fusão. As equações (5) e (6) definem respectivamente as semi-elipses frontal ($x \leq 0$) e traseira ($x > 0$).

$$q_f(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}f_f\eta P}{abc_f\pi^{3/2}} \exp\left(-3\left[\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c_f^2}\right]\right) \quad (5)$$

$$q_r(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}f_r\eta P}{abc_r\pi^{3/2}} \exp\left(-3\left[\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c_r^2}\right]\right) \quad (6)$$

onde:

- a e $b \Rightarrow$ dimensões da elipse na direção do comprimento e largura,
- c_f e $c_r \Rightarrow$ semi-eixos para frente e atrás da poça,
- f_f e $f_r \Rightarrow$ frações de energia.

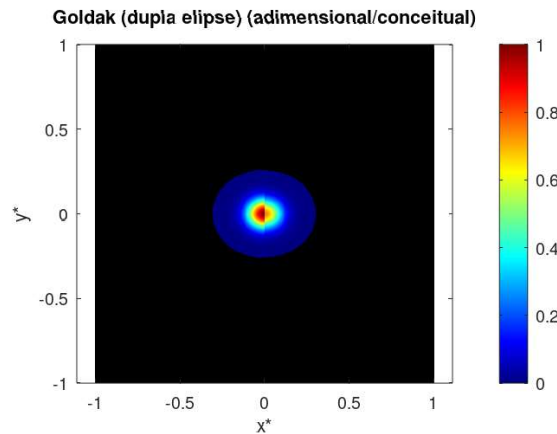


Figura 4. Modelo de Goldak (AUTORES, 2025)

O modelo de Goldak evoluiu em diferentes versões, sendo o clássico 3D aplicável a processos de arco, sendo o mais difundido; o Goldak alongado desenvolvido para processos de deposição por arco com múltiplos passes (WAAM), onde a poça é mais extensa; o Goldak adaptado para laser que considera maior concentração e penetração de calor em profundidade, reproduzindo o regime de “keyhole”; e o Goldak dinâmico com parâmetros dependentes da potência, velocidade ou corrente, aplicável em simulações paramétricas ou acopladas a estratégias de controle.

Estudos recentes Chenge et al. (2024) e Ertugrulet et al. (2025) mostram que a introdução de funções dependentes do processo amplia a robustez do modelo e reduz a necessidade de

recalibração experimental. A calibração do modelo de Goldak é essencial para garantir correspondência entre simulação e realidade. As principais abordagens incluem:

- Medição geométrica da poça de fusão: corte transversal do cordão de solda, seguido de análise metalográfica, determina largura e profundidade da penetração.
- Medições térmicas locais: instalação de termopares tipo K em pontos próximos ao cordão, registrando curvas temporais de temperatura.
- Imagem infravermelha: câmeras de alta velocidade ou termográficas captam mapas térmicos da superfície durante a soldagem.
- Pirômetros ópticos: utilizados para medir temperaturas pontuais em regiões específicas da poça.
- Ajuste por otimização: parâmetros são calibrados minimizando o erro entre curvas experimentais e simuladas.

Nos últimos anos, técnicas de inteligência artificial vêm sendo aplicadas à calibração. Ertugrulet et al. (2025) utilizou redes neurais artificiais para ajustar os parâmetros de Goldak em soldagem plasma, enquanto Chenge et al. (2024) aplicou processos gaussianos (GP) para calibração automática em manufatura aditiva a laser.

Para a validação experimental do modelo é preciso de instrumentação apropriada, tais como termopares que são instalados em regiões estratégicas do corpo de prova, permitindo captar perfis térmicos transientes; câmeras infravermelhas utilizadas para registrar a distribuição superficial de temperatura e acompanhar a evolução temporal da poça; sistemas ópticos para observar a geometria dinâmica da poça de fusão; conexão sincronizada dos sensores ao software de aquisição de dados do processo de soldagem, permitindo correlação entre parâmetros elétricos e térmicos; além de cortes transversais e polimento revelam dimensões do cordão e microestruturas. Dessa forma pode-se ter um conjunto de dados confiável para a calibração dos modelos numéricos.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O modelo de Goldak continua sendo o mais empregado em simulações de soldagem por arco (Zuo et al., 2020; Nain et al., 2021), devido à flexibilidade e simplicidade. Sua principal limitação reside na necessidade de calibração experimental extensiva, que pode demandar instrumentação sofisticada. Modelos gaussianos superficiais ainda se mostram mais adequados em soldagem a laser e L-PBF (Zuo et al., 2020), enquanto o Goldak modificado ou híbrido ganha espaço em WAAM (Nain et al., 2021) e processos multi-física.

Uma lacuna atual é a falta de protocolos padronizados para calibração: diferentes grupos de pesquisa adotam métricas distintas (largura da poça, curvas térmicas, imagens superficiais), o que dificulta comparações. Avanços recentes em aprendizado de máquina oferecem alternativas promissoras (Cheng, 2024; Ertugrul, 2025) para reduzir a dependência de tentativa e erro.

4 CONCLUSÕES

O modelo de Goldak consolidou-se como referência (Goldak et al., 1984; Zuo et al., 2020) para simulações numéricas de soldagem e manufatura aditiva. Apesar de suas limitações, apresenta vantagens significativas sobre modelos clássicos, especialmente para representar a assimetria da poça e a penetração volumétrica, assim, para processos de alta densidade de energia com penetração profunda e formação de “keyhole”, como soldagem a laser e feixe de elétrons, os modelos volumétricos tornam-se essenciais, entre eles, o modelo Volumétrico Gaussiano é o mais preciso e fisicamente representativo, apesar de sua complexidade (Zuo et al., 2020). O modelo Volumétrico Uniforme serve como uma ferramenta útil para análises iniciais (Nain et al., 2021) e de baixa complexidade, onde a captura do perfil exato de temperatura não é crítica, mas a representação da penetração é necessária.

A tendência atual na pesquisa é o acoplamento de modelos CFD (Dinâmica dos Fluidos Computacional) da poça de fusão com modelos MEF do sólido (Hu et al., 2024), buscando eliminar a necessidade de calibração empírica dos parâmetros da fonte, representando a física do processo de forma ainda mais completa, ou seja, a integração de métodos de calibração automática (Cheng, 2024; Ertugrul, 2025) e híbrida, associada a instrumentação avançada, garantindo maior robustez e aplicabilidade em processos diversos.

REFERÊNCIAS

- ERTUGRUL, G. Artificial neural network based calibration of Goldak heat source parameters in tandem plasma transferred arc process using finite element analysis. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2025. DOI:10.1007/s00170-025-15843-x.
- CHENG, J. A Gaussian Process-Based Extended Goldak Heat Source Model for Finite Element Simulation of Laser Powder Bed Fusion. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2024. DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.xxxxx.
- NAIN, V. et al. Development of an Elongated Ellipsoid Heat Source Model. *Frontiers in Materials*, 2021. DOI:10.3389/fmats.2021.747389.
- ZUO, S. et al. Numerical Simulation and Experimental Research on Welding and Heat Source Models. *Materials (Basel)*, v. 13, n. 13, p. 2798, 2020. DOI:10.3390/ma13132798.
- GOLDKAK, J.; CHAKRAVARTI, A.; BIBBY, M. A new finite element model for welding heat sources. *Metallurgical Transactions B*, v. 15, n. 2, p. 299–305, 1984. DOI: 10.1007/BF02667333.
- ROSENTHAL, D. The Theory of Moving Sources of Heat and Its Application to Metal Treatments. *T. ASME*, 1946.



PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM TANQUE COM NÍVEL DE ÁGUA CONTROLADO PARA FABRICAÇÃO DE PEÇAS POR MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO À ARCO

¹ Atos L. da Silva, ¹ Daniel Souza

¹ Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e Computação, Universidade Federal de Goiás
Av. Universitária, n° 1488 – quadra 86 – Setor Leste Universitário, 74605-010, Goiânia/GO, Brasil

silvalessio@discente.ufg.br, daniel.souza@ufg.br

DOI: 10.5281/zenodo.19041424

Resumo. A Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA) representa uma alternativa promissora aos métodos tradicionais de fabricação, permitindo a construção de peças metálicas complexas por meio da deposição sucessiva de cordões de solda. Embora apresente vantagens como a alta taxa de deposição e redução de desperdício de material, a MADA ainda enfrenta desafios técnicos importantes, como o controle térmico, anisotropia das propriedades mecânicas, defeitos como trincas e vazios, e necessidade de otimização da trajetória de deposição. O presente trabalho tem como objetivo o controle de temperatura da peça que está sendo produzida. Para isto, a peça é produzida dentro de um tanque com água de forma que o nível de água é mantido próximo da superfície da peça, assim ficando quase totalmente submersa, excetuando o topo, onde o material está sendo depositado.

Palavras-chave: Manufatura aditiva. MADA. Deposição a Arco. Quase imersão.

1 INTRODUÇÃO

A Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA) consiste na fabricação de pré-formas metálicas a partir da deposição de multicamadas de cordões de solda sobre um substrato. O domínio das técnicas, assim como o desenvolvimento de novos procedimentos de MADA possibilitará a fabricação de objetos dos mais diversos tipos de ligas metálicas, viabilizando a

fabricação de peças de materiais com altos níveis de dureza e/ou complexidade, que seriam de difícil fabricação por métodos convencionais e viabilizando a fabricação de pequenos lotes de peças.

Algumas das limitações que ainda são observadas no processo de MADA e são descritos pela literatura (Bartsch et al (2021), Liu et al (2020), Wu et al (2018), entre outros) são tais quais o tempo necessário para a fabricação de peças, refinamento de formas eficientes de geração de trajetórias, dissipação de calor do processo durante aplicações de peças pequenas ou que necessitem de alto aporte de calor, determinações de propriedades mecânicas adequadas às aplicações finais das peças, além de defeitos recorrentes desse processo de fabricação: vazios, trincas, dentre outros.

A imposição de inúmeros ciclos térmicos aos materiais utilizados nas peças (ou pré-formas) promove nestes materiais profundas modificações microestruturais ainda pouco estudadas na literatura. Estas alterações ficam ainda mais pronunciadas em materiais alta liga como os resistentes à corrosão e/ou ao desgaste (WANG; CHEN; SU, 2019). O mérito de cuidadosos estudos sobre desses ciclos repetidos reside na correlação entre microestrutura e propriedades mecânicas. As mudanças microestruturais provocadas podem degradar propriedades interessantes, que em materiais especiais estão na resistência à corrosão e/ou ao desgaste (WANG; CHEN, 2019).

Sendo o objetivo do presente estudo, produzir e testar um tanque de água para avaliar a microestrutura do Inconel 625 sob diferentes condições de resfriamento. Os objetivos específicos são: projeto e construção de um tanque de água para resfriamento das peças durante o processo MADA; parametrização do processo de soldagem para produção de pré-formas de Inconel 625 e avaliar o efeito da taxa de resfriamento na microestrutura, através da aplicação do método NIAC (Resfriamento Ativo por Quase Imersão).

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Manufatura Aditiva

A tecnologia para fabricação de peças através da Manufatura Aditiva (MA) – onde, conforme Gibson, Rosen e Stucker (2015), é um processo que possibilita a produção de geometrias complexas e personalizadas a partir de modelos 3D, se dá pela deposição sucessiva de camadas de material – foi desenvolvida por Charles Hull em 1986, a partir de um processo conhecido como estereolitografia, o primeiro processo de impressão 3D comercialmente viável.

Hoje, já amplamente disseminada e aceita, a MA é aplicável em diversos setores da indústria, em muitas etapas da fabricação, não mais apenas para prototipagem, mas até em estágios finais do produto, com uma ampla gama de materiais, indo de polímeros de alto desempenho a compósitos de fibras, passando pelo concreto no seu uso pela construção civil (Gibson et al. 2015).

2.2 Manufatura Aditiva por Deposição a Arco

Quando se fala em Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA), o material utilizado em questão é de metais, que vão de alumínio, a aço, além de ligas especiais. A deposição é dada a partir de um arco elétrico, aberto como na soldagem, à arco, de metal com gás de proteção, (Nilesh et al, 2021). Dessa forma, como o processo de deposição é semelhante a um processo de soldagem, os defeitos nos dois casos também se assemelham.

Apesar da revolução da MADA, algumas questões ainda restringem sua aplicação em larga escala. Parafraseando Nilesh et al. 2021, as inconsistentes ciclagens térmicas de deposição e solidificação podem gerar tensões residuais e porosidades nas peças, provocando microestruturas heterogêneas e propriedades mecânicas inferiores à processos convencionais de fabricação.

3 METODOLOGIA

Na construção do tanque, Figura 01, foram utilizadas chapas em alumínio, 400x400 mm, soldadas para garantir estanqueidade, com uma mesa interna para suporte da peça, em aço carbono. Na lateral foi fixado um tubo, com auxílio de um flange, para entrada e saída de água, Figura 02. Para armazenamento da água tem-se um reservatório maior auxiliar, Figura 03. A água é retirada deste por uma bomba submersa modelo WFish Wf650. Retornando para o mesmo ao final do experimento.

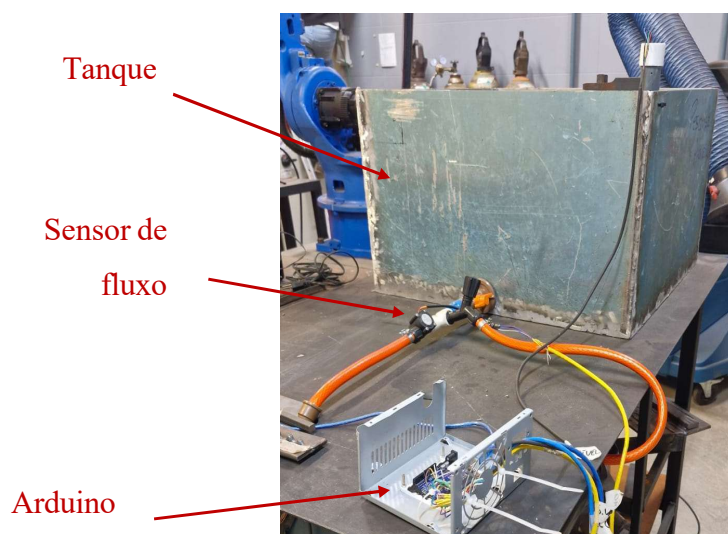


Figura 01 – Montagem do sistema.



Figura 02 – Detalhe da fixação interna do tubo.

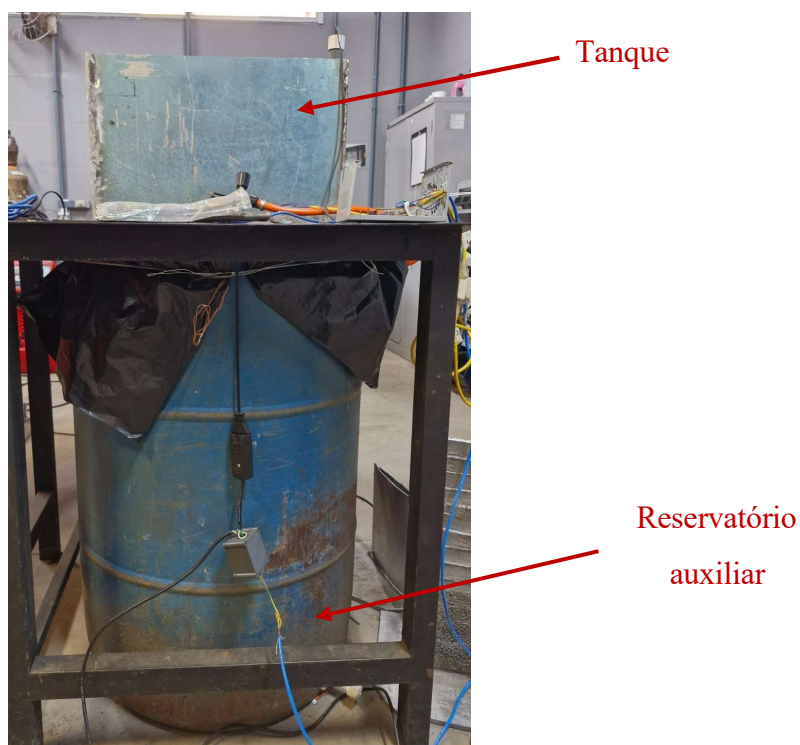


Figura 03 – Esquema de alocação dos dois tanques.

Para preencher o tanque deve-se observar a altura da peça que se constrói. À medida que cada camada é finalizada o nível de água sobe controladamente.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A determinação do quanto a água deve subir fez-se tomando a área da base do tanque, por 1,0 mm de altura, valor estipulado da altura de cada deposição, chegando a 355 mL.

A Figura 04 apresenta um fluxograma que simplifica o modelo da lógica de funcionamento do programa que controla o nível de água, já a Figura 05, ilustra as conexões entre os dispositivos do sistema.

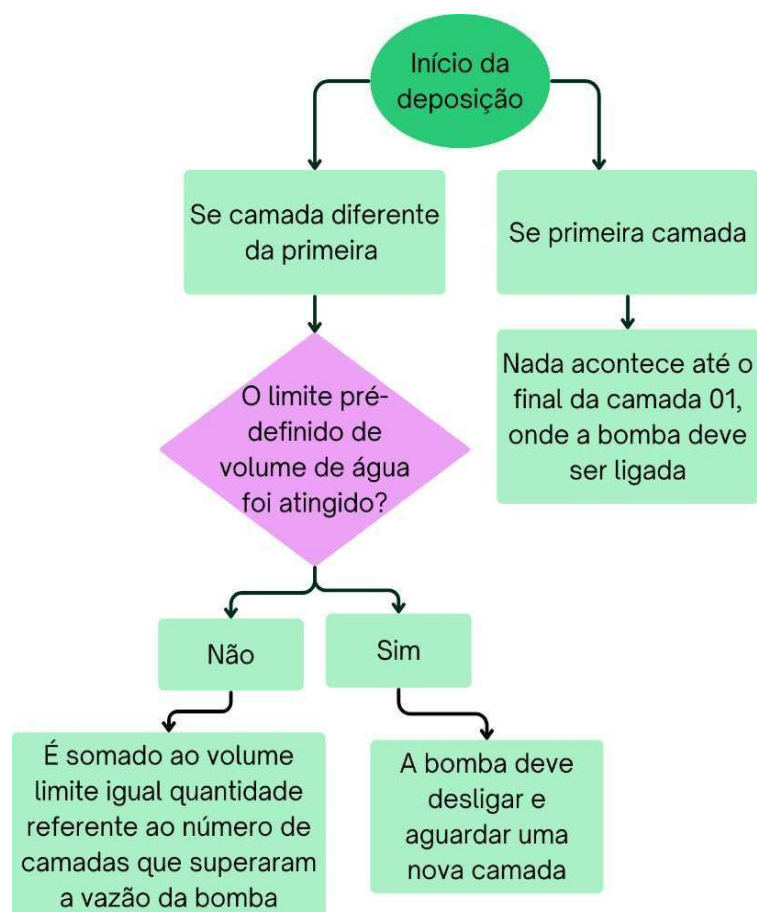


Figura 04 – Fluxograma lógico.

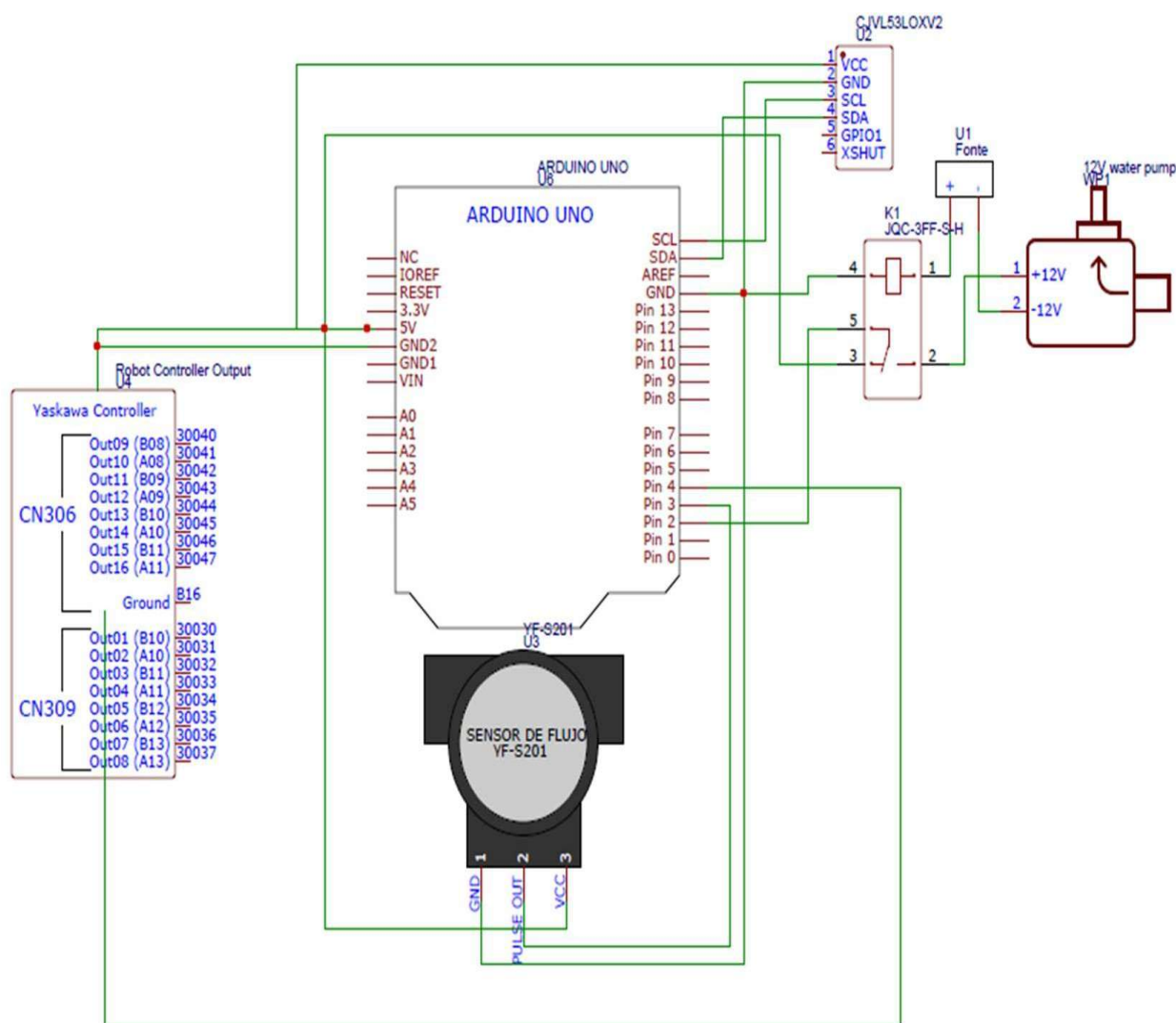


Figura 05 - Esquema de conexões entre tanque, braço robótico, Arduino e demais dispositivos.

O fluxo é monitorado por um sensor de fluxo, modelo YF-S201, acoplado em série com a bomba, esse é responsável por avisar ao Arduino quando a bomba deve desligar.

A fabricação das pré-formas metálicas é feita por braço robótico modelo Yaskawa Motoman HB20D, Figura 06. A programação interna do robô é escrita diretamente em seu próprio controlador, DX 100, usando-se do modo “Teach”.



Figura 06 – Robô Yaskawa Motoman HB20D.

Com esse alcançou-se um nível aceitável de controle de nível da água. A título de comparação foi feita uma peça, com o método MADA, sem o uso do processo NIAC, Figura 07.



Figura 07 – Peça cilíndrica, em Inconel 625, com 7,0 cm de diâmetro, construída com 30 camadas pelo processo MADA sem o resfriamento forçado.

5 CONCLUSÕES

Com o trabalho desenvolvido até o presente momento é possível a elaboração de peças simples através do processo MADA, com ou sem o resfriamento forçado. Entretanto, ainda se faz necessária uma otimização do programa em Arduino, e os testes finais para sua validação. Além da realização dos testes com a peça feita com o auxílio do método NIAC, para enfim verificar se há a perda das propriedades características do Inconel 625, se fazendo necessário um pós-

tratamento para recuperação dessas.

Agradecimentos. Agradecimentos especiais à Universidade Federal de Goiás (UFG), à Escola de Engenharia Mecânica, Elétrica e Computação, ao Laboratório de Máquinas e Fluidos (LAMAF), ao Programa de Pós-Graduação PPGMEC, e ao auxílio financeiro ofertado pela CNPq.

REFERÊNCIAS

- Liu, J., Xu, Y., Ge, Y. et al. Wire and arc additive manufacturing of metal components: a review of recent research developments. *Int J Adv Manuf Technol* 111, 149–198 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05966-8>
- Silva, L.J., Souza, D.M., de Araújo, D.B. et al. Concept and validation of an active cooling technique to mitigate heat accumulation in WAAM. *Int J Adv Manuf Technol* 107, 2513–2523 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05201-4>
- Wang Yangfan, Chen Xizhang, Su Chuanchu, Microstructure and mechanical properties of Inconel 625 fabricated by wire-arc additive manufacturing, *Surface and Coatings Technology*, Volume 374, 2019, Pages 116-123, ISSN 0257-8972, <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.05.079>.
- Wu, B., Pan, Z., Ding, D., Cuiuri, D., Li, H., Xu, J., Norrish, J., A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement, *Journal of Manufacturing Processes*, Volume 35, (2018), Pages 127-139, <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.08.001>.
- Yangfan Wang and Xizhang Chen 2019 *Mater. Res. Express* 6 106568, DOI 10.1088/2053-1591/ab39f6
- GIBSON, Ian; ROSEN, David W.; STUCKER, Brent. *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*. 2. ed. New York: Springer, 2015.
- HULL, Charles W. *Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography*. US Patent 4,575,330, 11 mar. 1986.
- LANJEWAR, Niles B. et al. Wire Arc Additive Manufacturing: Review on Recent Findings and Challenges in Industrial Applications and Materials Characterization. *Metals*, Basel, v. 11, n. 6, p. 939, jun. 2021.



REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DE JATOS COMPRESSÍVEIS UTILIZANDO MÉTODO PSEUDOSPECTRAL DE FOURIER E SIMULAÇÃO DE GRANDES ESTRUTURAS

¹ Thyago M. L. Silva, ² Aristeu da Silveira Neto, ¹ Felipe P. Mariano

¹ Laboratório de Engenharia Térmica e de Fluidos (LATEF), Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC), LATEF–UFG

Av. Esperança, s/n, Campus Samambaia, CEP: 74.690-900, Goiânia, Goiás, Brasil

² Laboratório de Mecânica dos Fluidos (MFLab), Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC), Universidade Federal de Uberlândia (UFU)

Av. João Naves de Avila - 2121 - Bloco 5P, Uberlândia, CEP: 38400-092, Minas Gerais, Brasil

thyagomarinho@discente.ufg.br, aristeus@ufu.br, fpmariano@ufg.br

DOI: 10.5281/zenodo.19041435

Resumo. Este artigo apresenta uma revisão bibliográfica sobre a modelagem numérica de jatos compressíveis, com ênfase na combinação entre a Simulação de Grandes Estruturas (LES) e o Método Pseudoespectral de Fourier (MPF). A partir da formulação das equações de escoamentos compressíveis, são discutidas as vantagens e limitações do Método Pseudoespectral de Fourier, destacando sua alta acurácia na avaliação de derivadas espaciais, o tratamento eficiente das não linearidades por meio da Transformada Rápida de Fourier (FFT), o uso de filtros como o dealiasing e a adoção de formas energeticamente estáveis. Também são abordados os desafios impostos por choques e expansões de Prandtl–Meyer. A metodologia baseia-se nas equações de Navier–Stokes para os balanços de massa, quantidade de movimento e energia total. Com base na análise dos trabalhos selecionados nas bases Scopus e CAPES (2015-2025), observou-se ampla produção individual sobre Jatos Compressíveis, MPF e LES, mas um número reduzido de estudos que integrem simultaneamente os três temas, revelando um campo ainda em consolidação. Conclui-se que estratégias híbridas, combinando o MPF e LES, representam uma perspectiva promissora para simulações mais fiéis e estáveis de Jatos Compressíveis.

Palavras-chave: Método Pseudoespectral de Fourier; Jatos Compressíveis; Simulação em

1 INTRODUÇÃO

Escoamentos cisalhantes livres, como jatos, esteiras e camadas de mistura, são fundamentais para aplicações aeroespaciais, nas quais a eficiência depende do controle de estruturas coerentes e de sua transição para a turbulência (ANDERSON, 2003). Um exemplo representativo de jato compressível pode ser observado no motor *Raptor* da SpaceX (Figura 1). Nesse tipo de sistema, o bocal atua convertendo energia térmica e de pressão em energia cinética, gerando escoamentos supersônicos caracterizados por ondas de choque, expansões de Prandtl–Meyer e turbulência (SUTTON; BIBLARZ, 2017). Em regimes compressíveis, a interação entre variações de massa específica, ondas de pressão e choques eleva a complexidade do problema, demandando métodos numéricos de alta acurácia (JACOB, 2015).

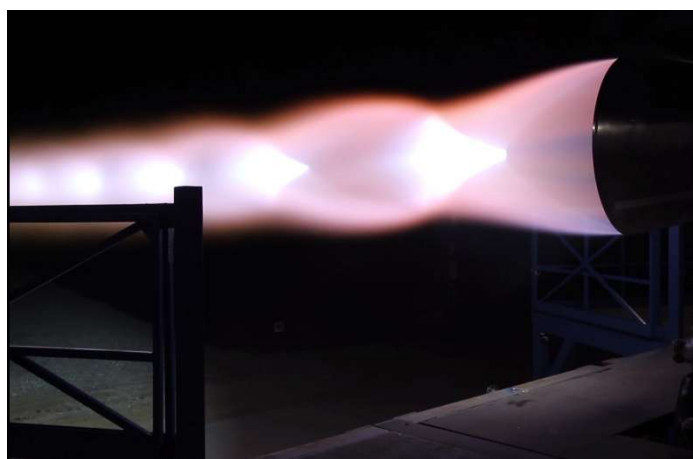


Figura 1: Teste de ignição do motor *Raptor*, (TESLARATI, 2025).

No presente trabalho adota-se a Simulação de Grandes Estruturas (LES) para modelagem de turbulência com discretização espacial pelo Método Pseudoespectral de Fourier (MPF), cuja taxa de convergência é limitada apenas pela acurácia numérica (CANUTO et al., 2007). Apesar dos avanços individuais em cada metodologia, a literatura carece de uma síntese integrativa que consolide os conhecimentos sobre a aplicação conjunta dessas abordagens em jatos compressíveis, justificando a presente revisão bibliográfica.

Esta integração metodológica é crucial para o desenvolvimento de sistemas propulsivos mais eficientes, redução de ruído aeroacústico e otimização de bocais em aplicações aeroespaciais.

O objetivo é realizar uma revisão bibliográfica da modelagem de jatos compressíveis, destacando a influência de choques, ondas de expansão e estruturas turbulentas, bem como as vantagens e limitações da abordagem MPF e LES nesse contexto.

2 DESENVOLVIMENTO

Nesta seção apresenta-se a síntese da revisão bibliográfica, estruturada em três eixos principais:

(i) jatos compressíveis; (ii) Método Pseudoespectral de Fourier (MPF); e (iii) Simulação de Grandes Estruturas (LES). Cada eixo aborda os conceitos fundamentais, avanços recentes e tendências identificadas nos estudos publicados entre 2015 e 2025, conforme levantamento bibliográfico realizado.

2.1 Jatos Compressíveis

Os jatos compressíveis constituem um dos temas mais relevantes no campo dos escoamentos cisalhantes livres, especialmente em aplicações aeroespaciais. Diferentemente dos jatos incompressíveis, esses escoamentos apresentam forte acoplamento entre variações de massa específica, gradientes de pressão e ondas de choque, resultando em uma dinâmica complexa e altamente não linear (ANDERSON, 2003).

A literatura evidencia que, em regimes supersônicos, os efeitos de compressibilidade modificam significativamente os mecanismos de dissipação e transporte turbulento. Interações entre ondas de choque, ondas de expansão de Prandtl–Meyer e estruturas coerentes produzem regiões alternadas de compressão e expansão, que influenciam a eficiência propulsiva e o ruído aeroacústico (ANDERSON, 2003).

Estudos recentes destacam que os jatos compressíveis oriundos de bocais apresentam três zonas características: uma região potencial inicial, dominada pela velocidade de saída; uma zona intermediária de transição, onde surgem instabilidades e estruturas coerentes; é uma região totalmente turbulenta, na qual o escoamento se mistura ao meio externo. A correta modelagem dessas regiões é essencial para compreender fenômenos associados à transferência de momento e à dispersão turbulenta (JACOB, 2015).

Nesse contexto, a combinação de métodos numéricos de alta ordem com modelagem de turbulência em grandes estruturas tem se mostrado uma ferramenta eficaz para descrever a interação entre turbulência, compressibilidade e ondas de choque, proporcionando uma representação mais fiel da física dos jatos compressíveis.

2.2 Método Pseudoespectral de Fourier

Os métodos espectrais, especialmente o Método Pseudoespectral de Fourier (MPF), destacam-se por sua elevada acurácia na resolução de derivadas espaciais e na representação de campos de escoamento complexos (JACOB, 2015). A literatura indica que esses métodos apresentam taxas de convergência superiores às obtidas por técnicas baseadas em diferenças finitas, desde que o campo de solução seja suave e o domínio possua condições de contorno periódicas. Essa abordagem permite capturar com precisão as variações espaciais do escoamento, tornando-se uma ferramenta valiosa em estudos de turbulência e dinâmica dos fluidos.

No MPF, as variáveis são expandidas em séries de Fourier, e as derivadas espaciais são obtidas por operações algébricas no espaço espectral. Os termos não lineares são tratados no espaço físico por meio da Transformada Rápida de Fourier (FFT), enquanto técnicas de filtragem, como a regra dos dois terços, são aplicadas para reduzir o efeito de aliasing e melhorar a estabilidade numérica (CANUTO et al., 2007; CANUTO et al., 2006; MARIANO, 2007; JACOB, 2015). A integração temporal é geralmente feita com esquemas explícitos de Runge–Kutta de múltiplos estágios, preferencialmente na forma skew-simétrica, garantindo melhor conservação de energia. Estudos recentes confirmam a eficiência e precisão dessa metodologia na simulação de escoamentos cisalhantes e jatos compressíveis (MARIANO, 2007; NASCIMENTO, 2016).

2.3 Simulação de Grandes Estruturas (LES)

A Simulação de Grandes Escalas (LES) é considerada uma abordagem intermediária entre a Simulação Numérica Direta (DNS) e os modelos de média de Reynolds (RANS), equilibrando custo computacional e acurácia. Em escoamentos compressíveis, sua aplicação requer a filtragem espacial das equações de Navier–Stokes, o que introduz termos adicionais associados às tensões e fluxos submalha. Esses efeitos são geralmente modelados por abordagens como Smagorinsky, dinâmico e WALE, que visam representar adequadamente a dissipação de energia nas pequenas escalas turbulentas (CANUTO et al., 2007; JACOB, 2015).

A integração da LES com o MPF tem se mostrado eficiente por combinar alta acurácia na resolução das grandes estruturas turbulentas com boa compatibilidade para o tratamento dos termos submalha. No entanto, a presença de descontinuidades, como ondas de choque, impõe desafios aos métodos espectrais, levando à adoção de técnicas de captura de choques e filtragem de alta frequência.

De modo geral, os estudos revisados apontam que essa combinação é uma ferramenta robusta para investigar jatos compressíveis, permitindo análises detalhadas da interação entre turbulência, compressibilidade e estruturas coerentes em aplicações aeroespaciais (JACOB, 2015).

3 METODOLOGIA

A metodologia baseia-se na distribuição da literatura revisada, na formulação matemática dos escoamentos compressíveis, associada à discretização por Método Pseudoespectral de Fourier (MPF) e à modelagem de turbulência via Simulação de Grandes Estruturas (LES) (JACOB, 2015).

3.1 Distribuição da Literatura Revisada

A revisão bibliográfica foi conduzida a partir de buscas estruturadas nas bases de dados Scopus (Elsevier) e na Base de Periódicos da CAPES, abrangendo o período de 2015 a 2025. Foram utilizados descritores em inglês, de modo a garantir a abrangência internacional e a padronização dos resultados, restringindo a seleção a artigos e revisões das áreas de Engenharia, Física e Matemática Aplicada. Essa abordagem assegurou a consistência metodológica e permitiu reunir um panorama atualizado sobre os avanços científicos relacionados ao tema.

Tabela 1: Número de publicações encontradas nas bases Scopus e CAPES.

Assunto / Combinação	Scopus CAPES Total		
Compressible Flow	336	6	342
Fourier spectral Method	2278	43	2321
Large Eddy Simulation (LES)	556	1	557
Compressible Flow + Spectral	6	0	6
Compressible Flow + LES	14	0	14
Spectral + LES	5	0	5
Compressible Flow + Spectral + LES	2	0	2

As consultas foram organizadas em três eixos principais: escoamentos compressíveis (Compressible Flow), Método Pseudoespectral de Fourier (Fourier Spectral Method) e Simulação de Grandes Estruturas (Large Eddy Simulation – LES), incluindo combinações entre esses termos para identificar interseções temáticas. Os resultados, apresentados na Tabela 1, mostram que,

embora os métodos espectrais e a LES sejam amplamente estudados individualmente, a aplicação conjunta em escoamentos compressíveis ainda constitui um campo em expansão, evidenciando a importância e originalidade da presente revisão bibliográfica.

3.2 Formulação Matemática e Modelagem

A metodologia baseia-se na formulação matemática dos escoamentos compressíveis, associada à discretização por MPF e à modelagem de turbulência via LES (JACOB, 2015). Diversos autores destacam que a descrição de escoamentos compressíveis exige a formulação completa das equações de balanço de massa, de quantidade de movimento linear e de energia (ANDERSON, 2003; JACOB, 2015; CANUTO et al., 2006). A equação da continuidade, que assegura o balanço da massa, é escrita como:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{u}) = 0, \quad (1)$$

onde ρ representa a massa específica e $\vec{u}$ o vetor velocidade (CANUTO et al., 2007).

O balanço da quantidade de movimento linear é representado pelas equações de Navier–Stokes compressíveis:

$$\frac{\partial (\rho \vec{u})}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) + \vec{\nabla} p = \vec{\nabla} \cdot \boldsymbol{\tau} + \mathbf{f} \quad (2)$$

Em que p é a pressão, $\boldsymbol{\tau}$ corresponde ao tensor de tensões viscosas e $\mathbf{f}$ indica as forças de corpo (CANUTO et al., 2007).

Já o balanço de energia total, incluindo efeitos de pressão, viscosidade e condução térmica, pode ser expressa como:

$$\frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho E \vec{u}) + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{u}) + \vec{\nabla} \cdot \vec{q} = \vec{\nabla} \cdot \boldsymbol{\tau} \vec{u} + \vec{f} \cdot \vec{u}, \quad (3)$$

Sendo $\vec{q} = -k \vec{\nabla} T$ o fluxo de energia térmica segundo a Lei de Fourier (CANUTO et al., 2007).

Na ausência de viscosidade, condução e forças externas, essas equações reduzem-se ao sistema de Euler, amplamente utilizado em estudos sobre ondas de choque, expansões de Prandtl–Meyer e regimes supersônicos (ANDERSON, 2003). A literatura revisada confirma que tais formulações constituem a base para investigações em jatos compressíveis.

A literatura revisada destaca o uso do MPF no tratamento numérico de escoamentos compressíveis, em que os campos de velocidade, pressão e energia são representados por séries

truncadas de Fourier, garantindo alta acurácia no cálculo das derivadas espaciais. Os termos não lineares são resolvidos no espaço físico por meio de Transformadas Rápidas de Fourier, enquanto o aliasing é controlado por técnicas como a regra dos dois terços, e a integração temporal é geralmente feita por esquemas explícitos de Runge–Kutta na forma skew-simétrica para maior estabilidade (JACOB, 2015; NASCIMENTO, 2016). Na modelagem da turbulência, a LES é aplicada por filtragem espacial, resolvendo as grandes escalas e modelando as submalhas com modelos como Smagorinsky, dinâmico e WALE. A combinação entre LES e o MPF é apontada como uma abordagem eficiente para o estudo de jatos compressíveis (JACOB, 2015).

4 DISCUSSÃO

Nesta seção são apresentados os principais resultados encontrados na literatura e suas implicações para a modelagem de jatos compressíveis utilizando o Método Pseudoespectral de Fourier (MPF).

4.1 Análise da Distribuição da Literatura

A Tabela 1 apresenta os resultados quantitativos obtidos nas bases Scopus e CAPES. A análise dos dados revela uma disparidade significativa entre a produção científica nos eixos individuais e nas suas interseções. Enquanto o MPF e a LES são temas maduros, com um grande volume de publicações, a aplicação conjunta dessas técnicas em escoamentos compressíveis retornou um número extremamente reduzido de resultados. Essa escassez na interseção completa não indica falta de relevância, mas sim a elevada complexidade e o custo computacional associados. A combinação exige o tratamento simultâneo de desafios robustos: a captura de choques e a estabilidade numérica. Os dados confirmam que este é um campo de fronteira do conhecimento, em fase de consolidação.

4.2 Formulação matemática dos escoamentos compressíveis

Os trabalhos revisados indicam que a descrição precisa de jatos compressíveis exige a formulação completa das equações de Navier-Stokes compressíveis ou, para escoamentos invíscidos, do sistema de Euler (CANUTO et al., 2007). A inclusão do balanço de energia torna-se mandatória devido aos altos números de Mach, cenário em que a variação da energia cinética interage fortemente com as propriedades termodinâmicas do fluido. Essa abordagem completa é essencial para capturar fenômenos físicos determinantes, como ondas de choque, expansões de Prandtl-Meyer e o acoplamento entre turbulência e compressibilidade (ANDERSON, 2003; CANUTO et al., 2007).

Em contraste com aproximações linearizadas ou potenciais, a literatura recente defende o uso das equações de conservação completas para regimes transônicos e supersônicos, visando representar corretamente gradientes de entropia e descontinuidades fortes que simplificações irrotacionais não conseguem captar (ANDERSON, 2003; JACOB, 2015). Essa robustez matemática é identificada como pré-requisito para simulações de alta fidelidade, confirmando que a aplicação da LES com o MPF sobre essa base teórica constitui uma fronteira de pesquisa ativa e necessária para avanços futuros.

4.3 Método Pseudoespectral de Fourier

A literatura mostra que o Método Pseudoespectral de Fourier (MPF) se destaca por sua alta ordem de acurácia e convergência, sendo limitado apenas pela capacidade computacional. Sua eficiência provém da expansão da solução em séries de Fourier discretas, o que transforma o cálculo das derivadas espaciais em simples produtos no espaço espectral. Para contornar o custo computacional das convoluções associadas aos termos não lineares, o método utiliza a Transformada Rápida de Fourier (FFT), permitindo realizar os cálculos no espaço físico e retornar ao espectral com alta precisão e baixo custo. Essa abordagem garante uma representação fiel dos gradientes e interações não lineares, sendo amplamente aplicada em estudos de turbulência e dinâmica dos fluidos (JACOB, 2015).

Pesquisas como as de Mariano (2007), Nascimento (2016) confirmam a eficácia do MPF na discretização das equações governantes, inclusive em domínios complexos quando associado ao Método da Fronteira Imersa (MFI). Contudo, sua aplicação é mais adequada a problemas com condições periódicas, devido à natureza global das funções base. O principal desafio relatado é o tratamento de descontinuidades, como as ondas de choque, que geram o fenômeno de Gibbs e comprometem a estabilidade numérica. Para mitigar esse efeito, empregam-se técnicas de filtragem e métodos de shock-capturing suavizado (CANUTO et al., 2006). Apesar dessas limitações, o MPF continua entre as ferramentas mais precisas disponíveis, sendo indispensáveis em Simulações Numéricas Diretas (DNS) e estudos de alta fidelidade em turbulência.

4.4 LES em escoamentos compressíveis

A Simulação de Grandes Estruturas (LES) destaca-se na literatura por oferecer maior fidelidade que os modelos de média de Reynolds (RANS), uma vez que resolve diretamente as estruturas turbulentas dominantes e modela apenas as menores escalas. Para atingir essa precisão, métodos numéricos de alta ordem são empregados, sendo o MPF um dos mais eficientes devido à sua elevada taxa de convergência e acurácia limitada apenas pela precisão computacional. Em

aplicações de LES ou DNS, essa metodologia permite reduzir erros dissipativos e dispersivos, enquanto modelos de submalha, como Smagorinsky e suas variantes dinâmicas, são usados para representar a dissipação associada às pequenas escalas.

Entretanto, a literatura aponta limitações no uso de MPF em escoamentos compressíveis devido à presença de descontinuidades, como ondas de choque, que geram o fenômeno de Gibbs e comprometem a estabilidade da solução. Estratégias como filtragem espectral e métodos de shock-fitting têm sido propostas para mitigar esses efeitos. Ainda assim, os estudos mais recentes sugerem o desenvolvimento de abordagens híbridas, capazes de combinar a acurácia dos métodos espectrais em regiões suaves com a robustez de esquemas de captura de choque, indicando a extensão do uso do MPF para escoamentos compressíveis como uma direção promissora de pesquisa futura.

4.5 Síntese crítica

De modo geral, a literatura converge para o reconhecimento de que o MPF, associado à LES, constitui uma abordagem robusta para a análise de jatos compressíveis. Sua principal contribuição está na elevada acurácia numérica, permitindo investigações detalhadas de instabilidades, transição para a turbulência e interação entre ondas de choque e estruturas coerentes. Entretanto, limitações ligadas ao custo computacional e ao tratamento de descontinuidades indicam que há espaço para avanços, principalmente em geometrias mais realistas de bocais. A revisão sugere que futuras pesquisas explorem estratégias híbridas, combinando métodos espectrais e técnicas de captura de choques, para expandir o uso dessa metodologia em aplicações industriais e aeroespaciais.

5 CONCLUSÃO

Os resultados da revisão bibliográfica convergem para a constatação de que o campo investigado se encontra em fase de consolidação, com avanços relevantes e oportunidades claras para aprofundamento. Observa-se um espaço promissor para estudos que aliem alto rigor numérico a estratégias computacionais robustas, capazes de ampliar a confiabilidade e o alcance das simulações em cenários mais realistas.

Nesse sentido, a principal contribuição deste trabalho é oferecer um panorama crítico que orienta escolhas metodológicas e aponta frentes de pesquisa com potencial de impacto, tanto científico quanto tecnológico.

Conclui-se que estratégias híbridas, combinando a alta acurácia espectral com técnicas robustas de *shock-capturing*, constituem uma via promissora para simulações estáveis de jatos compressíveis de interesse aeroespacial.

REFERÊNCIAS

- ANDERSON, J. D. *Modern Compressible Flow: With Historical Perspective*. 3rd. ed. New York: McGraw-Hill, 2003. ISBN 0-07-242443-5.
- CANUTO, C. et al. *Spectral Methods: Fundamentals in Single Domains*. Berlin: Springer-Verlag, 2006. (Scientific Computation). ISBN 978-3-540-30726-6.
- CANUTO, C. et al. *Spectral Methods: Fundamentals in Single Domains*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007. (Scientific Computation). ISBN 978-3-540-30726-6.
- JACOB, B. *Simulação Numérica de Escoamentos de Esteira por Método Pseudoespectral*. Tese (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil, 2015.
- MARIANO, F. P. *Simulação de Escoamentos Não Periódicos Utilizando as Metodologias Pseudo-Espectral de Fourier e da Fronteira Imersa Acopladas*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2007. Área de Concentração: Mecânica dos Fluidos. Orientador: Prof. Dr. Aristeu da Silveira Neto.
- NASCIMENTO, A. A. *Métodos Pseudoespectral de Fourier e Fronteira Imersa Aplicados a Escoamentos Simplificados de Engenharia de Perfuração*. Tese (Tese de Doutorado) — Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2016. Área de Concentração: Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos. Orientador: Prof. Dr. Elie Luis Martinez Padilla. Coorientador: Prof. Dr. Aristeu da Silveira Neto.
- SUTTON, G. P.; BIBLARZ, O. *Rocket and Spacecraft Propulsion*. 2. ed. Cham: Springer, 2017. ISBN 978-3-319-43099-2.
- TESLARATI. *SpaceX Raptor test firing*. 2025. <<https://www.teslarati.com/raptor-test-firing/>>. Acesso em: 29 set. 2025.



REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SISTEMÁTICA DA UTILIZAÇÃO DE PLANEJADOR AUTOMÁTICO EM CONTROLADORES INDUSTRIAIS

¹ Hiago S. Motta, ¹ João Paulo da S. Fonseca

¹ Universidade Federal de Goiás, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGMEC) – Av. Ingá, Quadra B, s/n, Campus Samambaia, CEP: 74.690-900 – Goiânia – Goiás – Brasil

hiagosmotta@gmail.com, jpsfonseca@ufg.br

DOI: 10.5281/zenodo.19041444

Resumo. O objetivo deste trabalho de revisão foi buscar documentos com maior convergência ao objetivo de estudo sobre a integração entre ambientes de programação de alto nível, capazes de utilizar IA para realizar o planejamento automático, com linguagem de programação de baixo nível, responsável pela automação de grande parte dos processos produtivos. Definiram-se Scopus e Web of Science (WoS) como bases de dados para a busca, e por meio da interseção de 3 grupos de palavras-chave principais: Planejamento automático, Indústria e Controle, foi realizada uma análise bibliométrica e cienciométrica para selecionar os principais documentos associados ao tema. A integração desses sistemas pode aumentar a velocidade de adaptação, por meio do planejamento automatizado, de diversos cenários que necessitam de automação, permitindo a programação e reprogramação de sistemas em tempo real. Os bancos de dados apresentam grande capacidade de filtragem tratando mais de 31 milhões de documentos e reduzindo para 92 trabalhos com maior acordo ao tema e, além disso, expôs o aumento de publicações seguindo linha de tendência exponencial de documentos sobre o assunto até a atualidade.

Palavras-chave: Planejamento automático, Indústria 4.0, Controlador, Sistema, Integração.

1 INTRODUÇÃO

Indústria 4.0 introduziu um novo paradigma para os sistemas de produção, caracterizado pela modularidade, reconfigurabilidade e integração entre todos os níveis da pirâmide de

automação (Vyskočil et al., 2023). Essa transformação busca tornar os sistemas mais responsivos às rápidas mudanças do mercado, promovendo maior flexibilidade e eficiência operacional. Diante da crescente variabilidade dos negócios e da redução do ciclo de vida dos produtos, intensifica-se a necessidade de ferramentas de planejamento e replanejamento capazes de lidar com tais demandas sem comprometer custos e prazos (Burggräf et al., 2021).

Nesse contexto, os sistemas de manufatura e montagem precisam operar em larga escala, atender pedidos personalizados e cumprir cronogramas rígidos, exigindo respostas rápidas e dinâmicas aos novos desafios (Hoebert et al., 2023). A automação desempenha, portanto, um papel central, especialmente por meio de robôs e sistemas inteligentes, que operam com precisão, velocidade e confiabilidade por longos períodos. No entanto, arquiteturas industriais tradicionais ainda enfrentam limitações significativas: qualquer atualização de produto ou modificação de processo requer a reprogramação manual dos Controladores Lógicos Programáveis (CLPs), demandando tempo, esforço e conhecimento técnico especializado (Hoebert et al., 2023; Fonseca et al., 2016).

Uma estratégia promissora para superar essas limitações consiste em adotar modelos que separem o conhecimento de domínio da lógica de execução, permitindo que os sistemas industriais se tornem mais autônomos e inteligentes (Ghallab et al., 2016). Nesse sentido, a representação formal do conhecimento, por meio de linguagens declarativas, possibilita que a automação realize inferências e gere planos de ação de forma independente. Conforme apontam Ghallab et al. (2016), os domínios de planejamento são fundamentados em modelos descritivos — que expressam “o que fazer” — enquanto a execução baseia-se em modelos operacionais — que definem “como fazer”. O primeiro pode operar em um ciclo aberto de raciocínio simbólico, enquanto o segundo deve atuar em um ciclo fechado de controle para garantir robustez e confiabilidade operacional.

A integração entre sistemas de planejamento automático (*AI Planning*) e CLPs representa, portanto, um desafio relevante. Os CLPs operam com linguagens de baixo nível voltadas à execução determinística, enquanto as ferramentas de *AI Planning*, baseadas em linguagens formais como o Planning Domain Definition Language (PDDL), trabalham em um nível abstrato de conhecimento, capaz de gerar planos automaticamente a partir de metas e restrições declaradas (Fonseca et al., 2016; Ghallab et al., 2016). Essa convergência entre camadas de raciocínio simbólico e controle físico cria uma ponte entre os níveis estratégico e operacional da automação industrial.

Segundo Marrella (2019), a evolução para a Indústria 4.0 — marcada por ambientes dinâmicos, imprevisíveis e pela crescente disponibilidade de dados — exige maior capacidade de

automação, reatividade e flexibilidade na gestão de processos. O uso de técnicas de Inteligência Artificial permite gerar comportamentos autônomos e adaptativos a partir de modelos de conhecimento, fortalecendo essa nova abordagem.

Com o intuito de otimizar o tempo de pesquisa e direcionar o desenvolvimento deste trabalho, optou-se pela realização de uma revisão bibliográfica sistemática com foco na integração entre sistemas de planejamento automático e sistemas programados em linguagens de baixo nível. Essa revisão busca identificar, classificar e analisar estudos que abordam a aplicação de AI Planning em ambientes industriais controlados por CLPs. Para isso, adotou-se uma metodologia rigorosa que envolve a seleção de fontes primárias de dados e a aplicação de métodos de tratamento e análise quantitativa e qualitativa dos resultados.

A revisão sistemática não apenas fornece uma visão abrangente sobre o estado da arte, mas também identifica lacunas de pesquisa e oportunidades para investigações futuras, contribuindo para o avanço do conhecimento na área e oferecendo insights relevantes para pesquisadores e profissionais. O artigo está estruturado em seções distintas: a Metodologia, que descreve o processo de seleção dos artigos e o uso de ferramentas bibliométricas e cienciométricas; os Resultados, que apresentam análises detalhadas das tendências, duplicações e crescimento temporal das publicações; e a Conclusão, que sintetiza os principais achados e suas implicações.

2 METODOLOGIA

Como o projeto visa a elaboração de uma nova solução, a metodologia tem como objetivo juntar todos os artigos que possuem maior intersecção de assunto com o tema: ‘Integração online entre uma plataforma de AI Planning e um ambiente prático controlado por PLC’. Para seleção de dados, foram utilizadas as bases de dados SCOPUS (Elsevier, 2024) e Web of Science (WoS) (Clarivate, 2024). Para análise dos dados foi utilizado o “Google Colaboratory” como ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) e a biblioteca PyBibX - uma biblioteca bibliométrica e cienciométrica alimentada por ferramentas de inteligência artificial - elaborada por Pereira (2024).

Com intuito de simplificar o método de pesquisa, foram criado três grupos de palavras com objetivo principal de aumentar os resultados com a utilização dos seus sinônimos:

- 1º Grupo: “*AI Planning*” $\cup$ “*Artificial Intelligence Planning*” $\cup$ “*Automated Planning*”;
- 2º Grupo: “*Industry*” $\cup$ “*Manufacturing*”;
- 3º Grupo: “*Control**”;

Onde o operador U representa união de palavras-chave sinônimas, enquanto o operador * aplica-se à busca por palavras cujo radical seja formado pelo termo “Control”.

A partir desses grupos de palavras principais, procedeu-se com a intersecção entre elas com o objetivo de promover melhor aderência da busca ao tema de interesse. Foram testadas sete combinações distintas, conforme apresentado na tabela 1.

Tabela 1: Combinações de grupos de palavras.

Combinação	Intervalos				
	1º Grupo	∩	2º Grupo	∩	3º Grupo
1º	X				
2º			X		
3º					X
4º	X	X	X		
5º	X			X	X
6º			X	X	X
7º	X	X	X	X	X

Além disso, durante a pesquisa é importante limitar os tipos de documentos que devem ser apresentados. Por exemplo, no Scopus há arquivos referentes a Conference paper, Article, Conference review, Book chapter, entre outros, que podem possuir informações parciais. Nesse sentido, aplicou-se um filtro para Conference paper e Article, tanto no Scopus, quanto no WoS. Outro ponto importante é referente à contabilização dos documentos duplicados, uma vez que foram utilizadas duas bases de dados, tornou-se necessária a remoção de duplicatas, realizada utilizando a biblioteca PyBibX no Google Colaboratory.

Com o número de trabalhos reduzidos bruscamente pelo filtro que visa a aderência ao tema, ainda é necessário fazer a classificação de qualidade dos trabalhos. Para esse propósito foi realizado a aplicação da Fórmula de Priorização. A Fórmula de Priorização é uma abstração das características de número de citações, ano de publicação, quantidade de citações por trabalhos publicados nas revistas/jornais e o percentil dos artigos.

$$\text{Fator de priorização} = (Ci \times 0,35) + (An \times 0,25) + (Cs \times 0,2) + (Pe \times 0,2) \quad (1)$$

- *Ci*: Número de citações do trabalho
- *An*: Ano de publicação

- *Cs*: Quantidade de citações por trabalhos publicados pela revista/jornal
- *Pe*: Percentil dos trabalhos

Após a classificação dos documentos, utilizando todos os dados normalizados, foram analisados os 15 melhores artigos com maior fator de priorização (Fp), obtendo assim uma lista com os trabalhos com maior aderência e qualidade acadêmica.

3 RESULTADOS

Por meio das combinações apresentadas na tabela 1, na data de 13/10/2025 foram realizadas buscas nas bases de dados Scopus e WoS, filtrando somente *Conference Paper* e *Article*, dando origem aos resultados da tabela 2.

A combinação 7 (interseção dos três grupos de palavras-chaves principais) retornou um total de 84 documentos na base de dados SCOPUS e 50 documentos na WoS.

Tabela 2: Quantidade de documentos encontrados em cada base de dados, em função da combinação admitida entre os grupos de palavras.

Combinação	1	2	3	4	5	6	7
Scopus	3340	2646472	18177952	244	774	576350	84
WoS	2305	1633225	9533133	160	370	249270	50
Total	5645	4279697	27711085	404	1144	825620	134

3.1 Estilo de escrita

Dos 136 documentos com maior grau de aderência ao tema desejado, foram identificados 44 documentos duplicados, permanecendo 92 documentos diferentes no conjunto final. Além disso, na tabela 3 também é possível verificar a quantidade de documentos do tipo *Article* e *Conference Paper* (ou *Proceedings Paper*) presentes em cada base de dados.

O valor geral observado foi de 47,8% de documentos do tipo *Article* e 52,2% de documentos do tipo *Conference* ou *Proceedings Paper*.

Tabela 3: Resultados obtidos.

Tipo de documento	Scopus	Scopus *	WoS	WoS *	Scopus U WoS	(Scopus U WoS)**
<i>Article</i>	40	16	28	4	68	44
<i>Conference paper / Proceedings Paper</i>	44	18	22	4	66	48
Total	84	34	50	8	134	92

*Exclusivo do banco

**Sem repetição de artigos

Dentre o total de 92 documentos remanescentes, a fim de determinar o potencial do tema, foi verificada a escala de produção de documentos e a figura 1 apresenta o gráfico do número de publicações acumuladas que envolvem a temática pelo ano de publicação. A figura 1, indica aquecimento na abordagem do tema crescente até o momento, com uma linha de tendência exponencial, demonstrando o aquecimento da abordagem da temática.

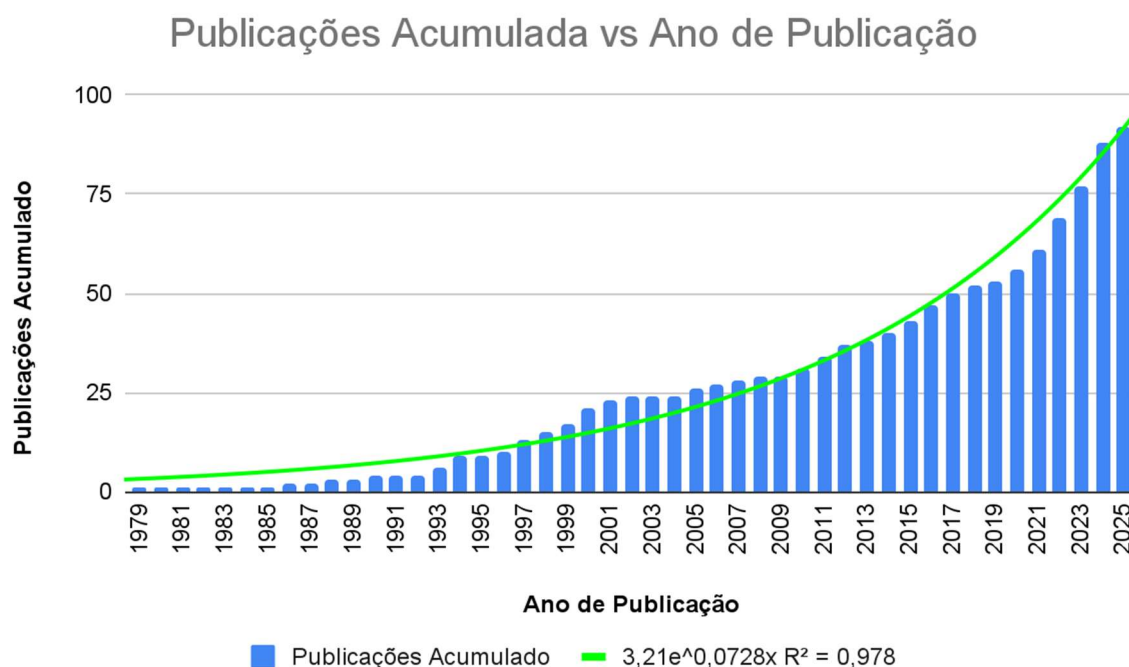


Figura 1: Evolução do número de publicações ao longo do período considerado.

O PyBibX apresentou também informações gerais extraídas dos bancos de dados, tais como número total de nações envolvidas, instituições, referências bibliográficas citadas pelos autores, média de autores por documento, média de citações por autor, entre outros, como indicado na tabela 5. Além disso, da tabela 5 é possível extrair diversas conclusões, como a dependência de parcerias para o desenvolvimento de documentos acadêmicos devido ao alto índice de colaboração e o grande número total de autores.

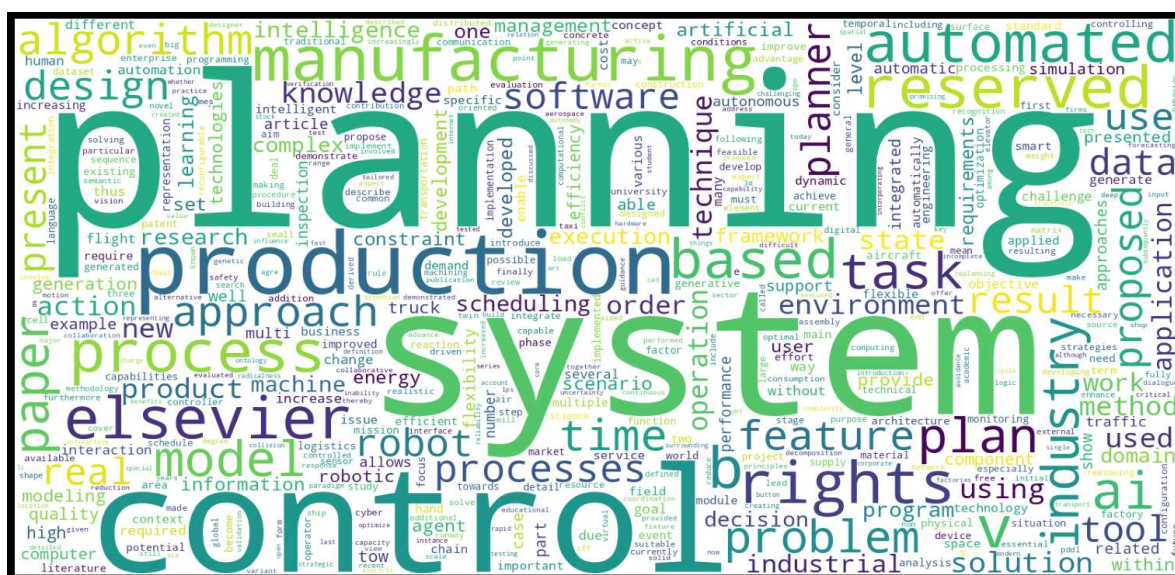


Tabela 4: As cinco palavras mais frequentes normalizada.

Importância	1	0,7	0,4433	0,433	0,35
Palavra	<i>"Planning"</i>	<i>"System"</i>	<i>"Control"</i>	<i>"Production"</i>	<i>"Manufacturing"</i>

Na tabela 5 é possível observar um panorama geral da temática proposta, como número de artigos, autores, referências, citações, além de nações e instituições envolvidas. O número de documentos de única e múltipla autoria de 10 e 82, respectivamente, indica um alto índice de colaboração, sendo 89,13% dos documentos de múltipla autoria, mostrando uma característica multidisciplinar do tema. A média de citações por documento de 10,71 é bem interessante, apontando aprovação dos documentos selecionados pelo meio acadêmico. O número de fontes, que indica que não há uma fonte ou grupo de fontes que retém maior quantidade de publicações, evidenciando a característica dispersa do tema (fato relacionado com a sua multidisciplinaridade). Além disso, pode-se inferir que, apesar disso, seria interessante que tais pesquisadores tivessem melhor direcionamento de suas publicações para fontes capazes de absorver melhor o assunto.

Tabela 5: Informações principais obtidas pelo PyBibX a partir da base de dados.

Informações Principais	Resultados
Período	1979–2025
Número total de países	31
Número total de instituições	132
Número total de fontes	58
Número total de referências	185
Número total de documentos	92
— Artigo	44
— Artigo de conferência	44
— Trabalho em anais	4
Média de documentos por autor	1,11
Média de documentos por instituição	2,3
Média de documentos por fonte	1,21
Média de documentos por ano	2,79
Número total de autores	274
Total de documentos de autoria única	10
Total de documentos com múltiplos autores	82

Índice médio de colaboração	3,22
Número total de citações	985
Média de citações por autor	3,59
Média de citações por instituição	7,46
Média de citações por documento	10,71

Com a aplicação da equação (1), a tabela 6 apresenta os *Fp* dos 15 trabalhos com maior relevância e, consequentemente, com maior aderência ao tema após uso da ferramenta PyBibx.

Tabela 6: Os 15 trabalhos mais aderentes e relevantes ao tema.

Autor	Título	<i>Fp</i>
(GRAESSLER, 2017)	<i>Integration of a digital twin as human representation in a scheduling procedure of a cyber-physical production system</i>	0,76
(PATEL, 2025)	<i>Ai patent approvals in service firms, patent radicalness, and stock market reaction</i>	0,66
(CIORTEA, 2018)	<i>Repurposing manufacturing lines on the fly with multi-agent systems for the web of things</i>	0,65
(MARCHETTA, 2010)	<i>An artificial intelligence planning approach to manufacturing feature recognition</i>	0,64
(HOEBERT, 2023)	<i>Knowledge-driven framework for industrial robotic systems</i>	0,63
(MCCLUSKEY, 2017)	<i>Embedding automated planning within urban traffic management operations</i>	0,63
(LAZAROIU, 2024)	<i>Cognitive digital twin-based internet of robotic things, multi-sensory extended reality and simulation modeling technologies, and generative artificial intelligence and cyber-physical manufacturing systems in the immersive industrial metaverse</i>	0,59
(MAY, 2021)	<i>Product generation module: automated production planning for optimized workload and increased efficiency in matrix production systems</i>	0,59
(WALLY, 2021)	<i>Leveraging iterative plan refinement for reactive smart manufacturing systems</i>	0,57
(PALOMBARINI, 2012)	<i>Smartgantt - an intelligent system for real time rescheduling based on relational reinforcement learning</i>	0,57
(VYSKOCIL, 2023)	<i>A digital twin-based distributed manufacturing execution system for industry 4.0 with ai-powered on-the-fly replanning capabilities</i>	0,56
(AGRAWAL, 2024)	<i>Moving toward lean construction through automation of planning and control in last planner system: a systematic literature review</i>	0,54
(BINNARD, 2000)	<i>Design by composition for layered manufacturing</i>	0,52
(HINOSTROZA, 2024)	<i>Temporal mission planning for autonomous ships: design and integration with guidance, navigation and control</i>	0,51
(HIND, 2024)	<i>Cynical technical practice: from ai to apis</i>	0,50

Os trabalhos apresentados na tabela 6 abordam e reafirmam a importância do tema. No trabalho com maior *Fp*, Graessler e Pöhler (2017) afirmam a importância da adoção de sistemas de produção ciberfísicos com capacidade de autocontrole para o incremento da colaboração homem-máquina ao invés da degradação da autonomia humana frente os sistemas fabris existentes. Já no trabalho de Hoebert *et al.* (2023), fica evidente que a programação e configuração de dispositivos robóticos, principalmente em pequenas demandas, é uma atividade que consome bastante tempo e recurso sendo um grande desafio para empresas de pequeno e médio porte. Neste trabalho, Hoerbet *et al.* (2023), ainda apresenta uma estrutura orientada a conhecimento utilizando um planejador automático para programação de robôs.

4 CONCLUSÃO

A utilização de métodos de análise para a revisão bibliográfica, obtidas pelo Scopus e o WoS, mostrou alta capacidade de filtragem. Inicialmente, com mais de 31 milhões de resultados nas pesquisas, somando-se cada grupo de palavras, convergiu-se para 136 documentos após realizar a intersecção deles. Progredindo o estudo, por meio da análise bibliométrica e cienciométrica, reduziu-se a quantidade de documentos validados para 92 após a comparação e identificação de documentos comuns entre os bancos de dados.

Com a utilização da biblioteca PyBibX para auxiliar na análise bibliométrica e cienciométrica, foi possível, além validar documentos, classificando e excluindo documentos do estudo bibliográfico, representar informações apresentadas em forma de gráficos, tabelas e figuras que ajudam a evidenciar e validar o crescente interesse sobre o tema de planejamento automático dentro da indústria.

Com a implementação da Fórmula de Priorização, na busca já refinada com o PyBibX, foi possível obter uma lista priorizando os 15 artigos com maior relevância no meio acadêmico levando em consideração o número de citações, ano de publicação, fator de citações/publicações das revistas/jornais e percentil dos trabalhos.

A integração entre ambientes de planejamento automático, capazes de utilizar IA, e ambientes físicos de controle, cotidianamente controlados por controladores com linguagem de baixo nível, impactam diretamente na capacidade de adaptação de um processo produtivo, cada vez mais se tornando mais dinâmico, atendendo a indústria 4.0.

Agradecimentos. Os autores agradecem ao PPGMEC/ UFG e a CAPES.

REFERÊNCIAS

- Burggräf, P.; Bergs, T.; Dannapfel, M.; Korff, A.; Esfahani, M. E.; Splettstoesser, A.; Steinlein, J., 2021. **Achieving parametric transparency in model-based factory planning**. *Prod. Eng. Res. Devel.* 15, 57–67, <<https://doi.org/10.1007/s11740-020-01010-6>>.
- Clarivate, 2024. **Web of science**. <<https://www.webofscience.com/wos/author/search>>.
- Elsevier, B., 2024. **Scopus**. <www.scopus.com>.
- Fonseca, J. P. S.; Sousa, A. R.; Ferreira, M. V. M.; Tavares, J. J. Z. S., 2016. **PlanPAS: PLC and automated planning integration**, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 29:11, 1200-1217, <<https://doi.org/10.1080/0951192X.2015.1067909>>.
- Ghallab, M.; Nau, D.; Traverso, P., 2016. **Automated Planning and Acting**. Manuscrito. Cambridge University Press.
- Graessler, I.; Pöhler, A. **Integration of a digital twin as human representation in a scheduling procedure of a cyber-physical production system**. In: 2017 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), 2017.
- Hoebert, T., Lepuschitz, W., Vincze, M. et al. **Knowledge-driven framework for industrial robotic systems**. *J Intell Manuf* 34, 771–788 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10845-021-01826-8>
- Marrella, A., 2019. **Automated Planning for Business Process Management**. *J Data Semant* 8, 79–98, <<https://doi.org/10.1007/s13740-018-0096-0>>.
- PEREIRA, V.; BASILIO, M. P.; SANTOS, C. H. T. **PyBibX: A Python Library for Bibliometric and Scientometric Analysis Powered with Artificial Intelligence Tools**. *Data Technologies and Applications*, v. 59, n. 2, p. 302-337, 2025. Disponível em: <https://pypi.org/project/pybibx/>. Acesso em: 13 out. 2025.
- Vyskočil, J.; Douda, P.; Novák, P.; Wally, B., 2023. **A Digital Twin-Based Distributed Manufacturing Execution System for Industry 4.0 with AI-Powered On-The-Fly Replanning Capabilities**. *Sustainability* 2023, 15, 6251 <<https://doi.org/10.3390/su15076251>>.



REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE A VIABILIDADE ESTRUTURAL DE VIGAS HÍBRIDAS USANDO MANUFATURA ADITIVA E ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS

¹ Gustavo P. da Silva, ¹ Demostenes Ferreira Filho, ¹ Sigeo K. Júnior

¹ Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Goiás (UFG)
Avenida Ingá, Prédio B5, Campus Samambaia, 74.690-900, Goiânia/Goiás, Brasil

silva.pereira@discente.ufg.br, demostenesferreira@ufg.br

DOI: 10.5281/zenodo.19041482

Resumo. Embora as estruturas metálicas ofereçam vantagens notáveis em sustentabilidade e eficiência, a sua ampla adoção na construção civil é limitada por questões como custo e métodos de produção tradicionais. O objetivo deste estudo foi realizar uma revisão bibliográfica sobre a viabilidade estrutural de vigas metálicas híbridas, que são produzidas combinando a fabricação convencional com a Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA). A MADA, com sua capacidade de criar geometrias complexas de forma rápida, surge como uma alternativa promissora. No entanto, sua aplicação em larga escala enfrenta desafios como a anisotropia das propriedades mecânicas, deformações térmicas e o surgimento de tensões residuais, que comprometem a integridade das peças. A construção híbrida é proposta como uma solução eficaz, unindo a eficiência dos processos de fabricação convencionais, como perfis laminados a quente, com a flexibilidade da MADA. Essa sinergia permite que a MADA seja aplicada de forma estratégica em áreas críticas, como em nós estruturais complexos ou reforços localizados. Para avaliar e otimizar essa abordagem, o Método de Elementos Finitos (MEF) é uma ferramenta fundamental. A simulação numérica permite prever e mitigar os desafios de fabricação sem a necessidade de protótipos físicos, assegurando a confiabilidade e o desempenho das estruturas. A pesquisa bibliométrica deste estudo confirma o crescimento da área e destaca a simulação numérica como um pilar essencial para a viabilidade da fabricação de vigas híbridas.

Palavras-chave: Manufatura Aditiva, Vigas Híbridas, Elementos Finitos, Análise Estrutural,

Tensões Residuais.

1 INTRODUÇÃO

O setor da construção civil no Brasil continua a depender em grande parte do concreto armado, apesar de as estruturas metálicas oferecerem benefícios importantes, como peso reduzido, precisão, rapidez de montagem e alta reciclabilidade do aço. A percepção de alto custo e um "preconceito cultural" em relação ao aço contribuem para a baixa adoção de métodos mais industrializados e sustentáveis. A Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA), também conhecida como Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM), é uma tecnologia disruptiva que pode enfrentar esses desafios. Com um custo inicial de equipamento relativamente baixo e altas taxas de deposição, a MADA permite a produção econômica e eficiente de componentes complexos (Yang; Wadee; Gardner, 2025a). Essa tecnologia promete um avanço semelhante à transição da transmissão manual para a automática em veículos uma vez que os benefícios de previsibilidade, qualidade e redução de riscos são comprovados, o retorno a processos menos eficientes torna-se inviável.

Apesar do seu enorme potencial, a aplicação da MADA em larga escala enfrenta desafios técnicos significativos. O processo envolve ciclos térmicos rápidos e localizados que geram gradientes de temperatura extremos, induzindo altos níveis de tensões residuais e distorções (empenamento) nos componentes fabricados (Ali; Han, 2023). Tais tensões podem comprometer a estabilidade e a integridade estrutural, sendo um ponto crucial para a viabilidade da tecnologia (Chethan Kumar; Jhavar, 2025). A Análise por Elementos Finitos (FEA) surge como uma ferramenta essencial para prever e mitigar esses problemas. Simulações numéricas permitem otimizar uma ampla gama de parâmetros de fabricação, que influenciam diretamente o histórico térmico da peça. Estes incluem o padrão de deposição, a velocidade de avanço, a energia de deposição (determinada pela corrente e tensão), e o tempo de permanência entre camadas (*inter-pass dwell time* ou DBCP). O controle do acúmulo de calor e a aplicação de estratégias de resfriamento são vitais para reduzir o impacto térmico e minimizar as tensões residuais.

A relevância desse estudo está na falta de conhecimento experimental sobre o comportamento estrutural de elementos feitos ou reforçados com MADA, o que impede a sua maior utilização na construção civil (Yang et. al 2025b). São necessários mais dados de testes para criar métodos de projeto estrutural confiáveis. Áreas que ainda precisam ser mais exploradas incluem como se comportam as peças fabricadas com MADA sob compressão e cargas

combinadas, a distribuição das tensões residuais em vigas e o desempenho de vigas de aço comuns que recebem reforço de Aço de Alta Resistência por meio da MADA (Weber; Meng; Gardner, 2025).

Nesse contexto, a Análise por Elementos Finitos (FEA) se mostra essencial. As simulações numéricas ajudam a prever e a reduzir problemas como a distorção e as tensões residuais, que são gerados pelos complexos efeitos térmicos e mecânicos do processo MADA (Yang et al., 2024). Quando os modelos de elementos finitos são validados por experimentos que reproduzem a fabricação e as condições de uso, eles se alinham muito bem com as medições reais de tensões e deformações. Por isso, esses estudos se tornam fundamentais para preencher o quebra-cabeça do conhecimento, oferecendo dados para o desenvolvimento de regras de projeto seguras e acelerando a adoção de uma tecnologia que pode tornar as estruturas de metal mais eficientes e duráveis.

Segundo Shukla et al., (2025), a utilização de simulações computacionais é fundamental para complementar a caracterização experimental de materiais produzidos via WAAM. Enquanto testes físicos são impraticáveis para análises complexas e de grande escala, um modelo de elementos finitos validado permite quantificar a resposta mecânica sob diversas condições de carregamento, o que acelera o processo de projeto, aumenta a confiança no uso desses componentes em aplicações estruturais e facilita a otimização de seu design.

Haja visto a relevância do tema que se sustenta nos apontamentos apresentados, essa pesquisa parte de uma revisão bibliográfica visando acompanhar o desenvolvimento de processos e resultados de outras pesquisas relacionadas a MADA. Para bem avaliar a aplicabilidade do método em vigas híbridas, focando em propriedades mecânicas, deformações térmicas e tensões residuais. E por fim analisar a utilização do FEA como ferramenta de simulação e avaliação do desempenho estrutural e de fabricação.

2 METODOLOGIA

O presente estudo foi conduzido como uma revisão bibliográfica analítica com o objetivo de sintetizar o conhecimento atual sobre a viabilidade estrutural de vigas metálicas híbridas que empregam a Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA). Para garantir o rigor e a abrangência da coleta de dados, foi aplicada uma análise bibliométrica para a seleção e triagem inicial dos documentos. A pesquisa foi realizada nas bases de dados Scopus (Figura 01) e Web of Science (WoS) (Figura 02), fontes essenciais para a literatura revisada por pares em Engenharia e Ciência dos Materiais. A estratégia de busca foi desenhada para capturar os artigos mais relevantes sobre a modelagem e aplicação da MADA em elementos estruturais.

Search within Article title, Abstract, Keywords	Search documents * "Wire arc additive manufacturing"
AND	
Search within Article title, Abstract, Keywords	Search documents "WAAM"
AND	
Search within Article title, Abstract, Keywords	Search documents "Finite elements analysis"

Figura 1. Busca por palavras chaves para Wire Arc Additive Manufacturing (Scopus, 2025)

"Manufatura aditiva por arco de arame" (todos os campos) e "WAAM" (todos os campos) e "Análise de elementos finitos" (todos os cam... → Copiar link da consul

Todos os campos	Exemplo: doença hepática Índia Singl "Wire arc additive manufacturing"	
E	Todos os campos	Exemplo: doença hepática Índia Singl "WAAM"
E	Todos os campos	Exemplo: doença hepática Índia Singl "Finite Element Analysis"

Figura 2. Busca por palavras chaves para Wire Arc Additive Manufacturing (WoS, 2025)

A coleta de metadados e a análise inicial foram realizadas utilizando o pacote de código aberto Bibliometrix para a linguagem de programação estatística R. A aplicação desta ferramenta permitiu a importação e o tratamento dos dados brutos exportados da Scopus e da WoS garantiram a identificação de artigos duplicados e a depuração inicial.

A escolha desse método permitiu analisar tendências de publicação, os autores mais influentes e o crescimento da produção científica na área, confirmando a relevância da pesquisa. A ferramenta facilitou a organização e a categorização dos artigos mais citados, assegurando que o foco da revisão permanecesse nas publicações de maior impacto. O período considerado para inclusão dos documentos abrange os anos de 2017 até o momento atual (setembro de 2025), garantindo a análise das tendências e dos avanços mais recentes.

Os critérios de seleção priorizaram artigos de periódicos que detalham ensaios estruturais e o emprego de Análise por Elementos Finitos (FEA), com foco direto na aplicação em vigas e componentes estruturais para a construção civil.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O levantamento bibliométrico inicial e a análise do acervo científico confirmam o crescente interesse global na Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA/WAAM), especialmente no contexto de aplicações estruturais. A pesquisa nas bases de dados Scopus e Web of Science, empregando termos focados em MADA/WAAM e Análise por Elementos Finitos (MEF), revelou a existência de 75 artigos na Scopus e 66 artigos na WoS. Este volume atesta a consolidação da área, com a modelagem numérica sendo amplamente reconhecida como um requisito indispensável para a validação e o avanço da tecnologia.

A evolução da produção científica reflete o amadurecimento do tema no período de 2017 até o momento atual (Figura 03). A análise dos dados demonstra um crescimento exponencial no número de publicações, com uma aceleração perceptível a partir de 2020. Tal expansão indica uma rápida transição de estudos puramente conceituais e metalúrgicos para a validação e aplicação prática. A alta frequência da Análise por Elementos Finitos nos metadados confirma que esta metodologia se estabeleceu como um pilar fundamental para garantir a integridade estrutural, prever os complexos desafios de fabricação e acelerar a adoção da MADA na engenharia. Contudo, é fundamental notar que uma busca intencional por termos como "vigas híbridas" resultou em um número nulo de achados, demonstrando que a área de estudo ainda carece de terminologia padronizada ou que o foco da pesquisa ainda não alcançou a etapa de componentes híbridos com nomenclatura explícita.

Grande parte dos trabalhos ainda se concentra em aspectos do processo e da metalurgia, havendo uma baixa representatividade de palavras-chave ligadas diretamente a componentes estruturais específicos ou a requisitos práticos da construção civil. Essa lacuna aponta para a necessidade urgente de aumentar as investigações focadas na validação em nível de elemento estrutural, o que é crucial para a criação de regras de projeto e normas de aplicação robustas.

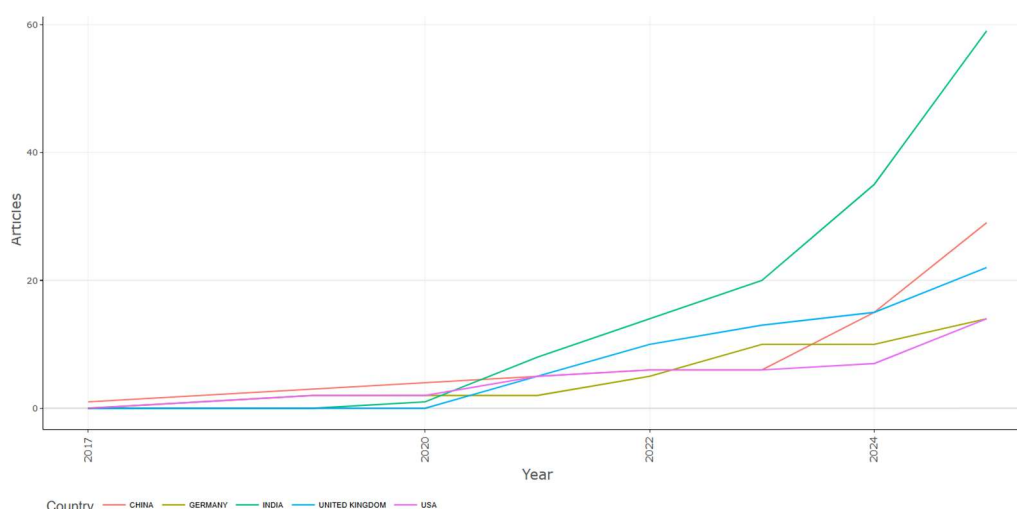


Figura 3. Evolução de produção científica anual (Rstudio, 2025)

A viabilidade de componentes estruturais reforçados pela MADA repousa sobre a capacidade de otimização e validação proporcionada pelo MEF. Essa ferramenta é imprescindível para antecipar e mitigar os efeitos termomecânicos do processo de fabricação. Segundo Yang *et al.* (2024) modelos com eficácia comprovada, a exemplo do Método Semi-Estático Simplificado que se mostrou capaz de reduzir o custo computacional em até 98% em relação a métodos transientes e a Abordagem Híbrida Numérico-Analítica permitem a previsão precisa da distribuição de tensões residuais e o comportamento à falha. A precisão desses modelos é vital para entender como o processo MADA, ao modificar o padrão de tensões originais, contribui para o aumento desproporcional da capacidade de carga em estruturas convencionais, validando a alta eficiência da construção híbrida.

A produção científica global sobre MADA revela uma notável hierarquia e uma clara especialização geográfica. A China e a Índia surgem como os principais geradores de conteúdo (Figura 04), concentrando o maior volume de publicações e apresentando as curvas de crescimento mais acentuadas no período sob escrutínio. Paralelamente, na Europa, nações como o Reino Unido e a Alemanha mantêm uma contribuição substancial, mas com uma ênfase distinta: seus esforços de pesquisa são frequentemente direcionados à validação de modelos e aos aspectos de normatização da tecnologia. Essa divisão sugere que, embora o grande volume de dados e o interesse sejam liderados por nações asiáticas, a consolidação do conhecimento focado na aplicação estrutural e na criação de regras de projeto está sendo robustamente impulsionada pelos

centros de engenharia europeus. Essa distinção é crucial para a eventual transposição da MADA para o rigoroso ambiente da construção civil.

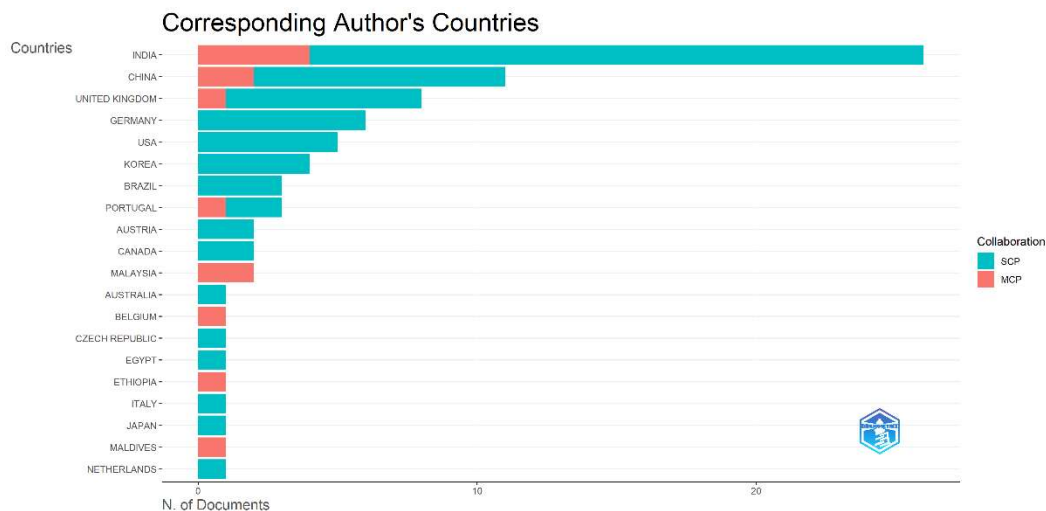


Figura 4. Países com maior quantidade de artigos (Rstudi,2025)

3.1 Análise por Elementos Finitos (FEA) como Ferramenta Preditiva

A análise da literatura demonstra uma conclusão consistente: o emprego da Análise por Elementos Finitos (FEA) é uma prática extensiva e indispensável para a simulação do processo de Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (WAAM). A modelagem numérica é reconhecida como um pilar essencial para a viabilidade da fabricação de componentes com geometrias complexas, pois fornece uma compreensão detalhada do comportamento do material. O Método de Elementos Finitos (MEF) é a principal abordagem computacional utilizada para decifrar os complexos fenômenos multifísicos que ocorrem durante o processo.

Montevecchi et al., (2016) destacam que as simulações termo-mecânicas sequencialmente acopladas representam a metodologia mais comum para a previsão e o entendimento dos fenômenos de fabricação. Essas análises são cruciais, pois o histórico térmico, que abrange a distribuição de temperatura e as taxas de resfriamento, exerce influência direta na evolução das tensões residuais e nas deformações finais da peça, também conhecidas como empenamento. A inserção de calor localizado induz gradientes de temperatura significativos, que são a principal causa das distorções e tensões capazes de comprometer a integridade e o desempenho estrutural do componente. A capacidade preditiva da FEA é utilizada para simular esses efeitos em uma vasta gama de materiais, incluindo aço EH36, ligas de alumínio, Ti-6Al-4V, e Inconel 625.

Essa abordagem preditiva, torna possível otimizar parâmetros do processo e testar diversas estratégias de deposição com alta eficiência e menor custo. Diante do alto custo e do tempo

demandado por investigações experimentais extensivas, a modelagem computacional torna-se um instrumento vital para quantificar a resposta do material sob distintas condições de fabricação. Portanto, o MEF constitui um meio eficaz para estudar a mitigação de distorções e tensões, minimizando a necessidade de protótipos físicos.

3.2 Tensões Residuais e Deformações como Principais Desafios

Segundo Yang et al., (2024) as tensões residuais e as deformações (distorção ou empenamento) são consistentemente identificadas nas fontes como os principais desafios e preocupações do processo WAAM. Esses fenômenos são uma consequência direta dos complexos ciclos térmicos inerentes ao processo, que envolvem aquecimento localizado intenso seguido de resfriamento rápido. O histórico térmico, com gradientes de temperatura severos e não uniformes, é a causa fundamental desses problemas. O mecanismo de deformação se manifesta porque a diferença de temperatura entre a superfície superior e a inferior da peça gera uma expansão térmica desigual que, ao ser restringida pelas fixações, causa tensões de compressão e, consequentemente, o encurvamento da peça.

As tensões residuais de tração podem ser muito altas, chegando a exceder o limite de escoamento do material em alguns casos, o que afeta negativamente a vida em fadiga e a integridade estrutural da peça. Esses altos níveis de tensão podem levar a problemas como flambagem, fratura frágil e trincas induzidas por tensão. Em ligas de aço, as tensões residuais longitudinais de tração podem, inclusive, superar a resistência ao escoamento do material (Yang; Wade; Gardner, 2025a). Com um projeto cuidadoso, as tensões residuais podem ser estrategicamente aproveitadas para melhorar o comportamento estrutural. Um exemplo é o reforço de colunas, onde um padrão favorável de tensões é induzido termicamente durante o processo WAAM para retardar o início do escoamento sob compressão.

As deformações e distorções comprometem a precisão dimensional dos componentes fabricados, exigindo etapas adicionais de pós-processamento, como usinagem, ou estratégias de mitigação durante a fabricação. Segundo Huang (2022) medições em peças fabricadas por WAAM mostram que as amplitudes de imperfeição geométrica geralmente ficam entre 0,5 mm e 2,5 mm, valores superiores aos observados em seções produzidas convencionalmente.

3.3 Influência dos Parâmetros de Processo nos Resultados

Diversos estudos investigam como os parâmetros do processo WAAM influenciam diretamente a magnitude das tensões residuais e das deformações, sendo cruciais para a otimização

e confiabilidade das peças fabricadas. A escolha minuciosa desses parâmetros é fundamental para garantir um resultado satisfatório ao fim do processo.

Yang; Wade; Gardner, (2025b) demonstra que o padrão de deposição tem um impacto significativo nos resultados, influenciando diretamente o histórico térmico, a distribuição de tensões e a deformação da peça. Os padrões podem ser categorizados em lineares e de contorno ou espirais. Padrões Descontínuos, exigem múltiplas paradas e reinícios do arco para formar a geometria. Essa característica pode levar a imprecisões geométricas e à concentração de tensões residuais, especialmente nas direções de deposição e nas posições de início e fim de cada cordão.

Padrões contínuos, como o zigue-zague, mitigam o problema das paradas ao conectar o final de uma linha ao início da próxima. Em estudos comparativos, o padrão zigue-zague demonstrou gerar o menor nível de tensão residual entre as estratégias analisadas.

Padrões de Contorno (espirais), como in-out e out-in, podem gerar um maior acúmulo de calor e tempos de resfriamento mais longos, resultando em tensões e deformações mais elevadas. Han (2024), explica que o padrão out-in tende a concentrar o calor na região central da peça, gerando maiores tensões e empenamento, enquanto o in-out dispersa o calor durante a deposição, resultando em tensões mais baixas. A escolha do padrão de deposição pode afetar mais as tensões e deformações do que a própria energia de deposição.

A energia de deposição (determinada pela corrente e tensão) e a velocidade de avanço da tocha são fatores cruciais que afetam diretamente a quantidade de calor envolvida no processo. Geralmente, uma maior energia de deposição (ou potência da fonte de calor) leva a maiores deformações (empenamento), independentemente do padrão de deposição utilizado. O aumento da velocidade de avanço da tocha (travel speed) pode reduzir o acúmulo de calor e, conseqüentemente, diminuir os níveis de tensões residuais. Uma velocidade maior diminui o tempo disponível para o acúmulo de calor, o que leva a temperaturas de pico mais baixas e gradientes térmicos menores, resultando em menor geração de tensões.

3.4 Aplicações em Estruturas Híbridas e Reforços

O conceito de construção híbrida, na qual a tecnologia WAAM é combinada com componentes fabricados por métodos convencionais, como perfis laminados a quente. Essa abordagem é vista como uma solução eficaz, unindo a eficiência dos processos de fabricação tradicionais com a flexibilidade da manufatura aditiva.

Gardner et al., (2024) demonstra que a WAAM é utilizada para adicionar reforços ou geometrias complexas em locais estratégicos de perfis metálicos padrão (como vigas I),

possibilitando o reforço de estruturas novas ou existentes, bem como o reparo de componentes. A MADA é empregada em áreas críticas onde sua flexibilidade geométrica agrega maior valor, como em nós estruturais complexos ou reforços localizados. A capacidade de depositar material de forma direcionada em locais ótimos permite ganhos significativos de capacidade com acréscimos modestos de material.

Os resultados demonstram que essa estratégia leva a aumentos desproporcionalmente altos na capacidade de carga e na eficiência estrutural, com apenas um modesto acréscimo de massa.

O objetivo é criar um diagrama de momento resistente que acompanhe de perto o diagrama de momento fletor aplicado, tornando a utilização do material mais uniforme e eficiente. Gardner et al., (2024) apresenta um estudo experimental com colunas de perfil I reforçadas com WAAM nos flanges demonstrou aumentos na capacidade de carga axial entre 17% e 54% com um aumento de massa de apenas 2% a 26%. Em alguns casos, a eficiência do material WAAM adicionado foi quase oito vezes maior que a do perfil de aço original em termos de contribuição para a resistência à flambagem.

Essa abordagem híbrida tem o potencial de melhorar significativamente o desempenho e a eficiência, tornando-se uma tecnologia transformadora na construção de novas estruturas e na reabilitação de infraestruturas existentes.

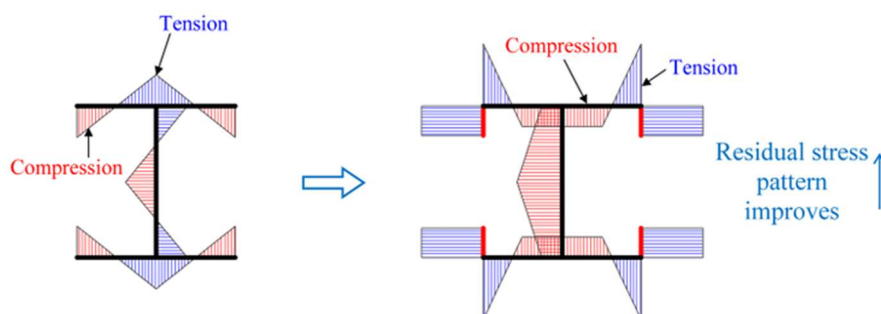


Figura 5. Mecanismos de fortalecimento alcançados pela adição de reforços por MADA
GARDNER et al. (2024, Figura 2)

4 CONCLUSÃO

Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (WAAM) consolida-se como uma tecnologia de grande potencial para a engenharia estrutural. Contudo, sua adoção depende da superação do desafio das tensões residuais e deformações, consequências diretas dos ciclos térmicos intensos do processo. Nesse contexto, a Análise por Elementos Finitos (FEA) emergiu como uma ferramenta

preditiva indispensável. As simulações, que otimizam parâmetros como o padrão de deposição para mitigar tensões, e utilizam métodos eficientes como o Semi-Estático Simplificado, são cruciais para a validação e redução da dependência de protótipos físicos.

A manufatura aditiva por deposição a arco (MADA/WAAM) é uma tecnologia promissora para a engenharia estrutural, especialmente na construção híbrida, que combina a eficiência da fabricação convencional com a flexibilidade da MADA para reforços localizados e geometrias complexas. No entanto, o processo enfrenta desafios significativos, como as tensões residuais e as distorções (empenamento), que são consequências diretas dos ciclos térmicos localizados e dos gradientes de temperatura extremos. Nesse contexto, a análise por elementos finitos (FEA) se estabelece como uma ferramenta preditiva indispensável para simular os complexos fenômenos termo-mecânicos, otimizar parâmetros de fabricação (como o padrão de deposição e o controle do acúmulo de calor) e mitigar defeitos, minimizando a necessidade de protótipos físicos e acelerando o processo de projeto.

REFERÊNCIAS

- ALI, Muhammad Hassaan; HAN, You Sung. A Finite Element Analysis on the Effect of Scanning Pattern and Energy on Residual Stress and Deformation in Wire Arc Additive Manufacturing of EH36 Steel. *Materials*, v. 16, n. 13, 1 jul. 2023.
- CHETHAN KUMAR, N.; JHAVAR, Suyog. Substrate-centric comparative analysis and validation of finite element and empirical models for residual stress prediction in remanufactured WAAM-fabricated SS316 parts. *Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design*, v. 8, n. 1, 1 jan. 2025.
- GARDNER, L. et al. I-section steel columns strengthened by wire arc additive manufacturing - concept and experiments. *Engineering Structures*, v. 306, 1 maio 2024.
- MONTEVECCHI, Filippo et al. Finite Element Modelling of Wire-arc-additive-manufacturing Process. In: Elsevier B.V., 2016.
- SHUKLA, Pranjali et al. An integrated experimental and computational framework for design and analysis of WAAM fabricated structural elements. *Structures*, v. 79, 1 set. 2025.
- WEBER, Ben; MENG, Xin; GARDNER, Leroy. Local buckling behaviour of wire arc additively manufactured steel I-sections under axial compression and combined loading. *Thin-Walled Structures*, v. 211, 1 jun. 2025.
- YANG, Jiachi et al. Simulation and prediction of residual stresses in WAAM-strengthened I-sections. *Structures*, v. 69, 1 nov. 2024.
- YANG, Jiachi; WADEE, M. Ahmer; GARDNER, Leroy. Residual stresses in steel I-section beams strengthened by wire arc additive manufacturing. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 232, 1 set. 2025a.
- YANG, Jiachi; WADEE, M. Ahmer; GARDNER, Leroy. Strengthening of hot-rolled S355 steel I-section beams using WAAM high strength steel. *Thin-Walled Structures*, v. 215, 1 out. 2025b.
- Aria, M., & Cuccurullo, C. (2017). bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*, 11(4), 959-975.



REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE MODOS DE DESGASTE EM LIGAS A BASE DE FeCrC

¹ Geovanna P. de Souza, ¹ Daniel Souza

¹ Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Goiás
Campus Samambaia, Al. Ingá, Prédio B5 Eng. Mecânica, Goiânia/Go, Brasil

geovannapinheiro@discente.ufg.br, daniel.souza@ufg.br

DOI: 10.5281/zenodo.19041519

Resumo. Conhecer os modos de desgaste é fundamental para entender como os materiais se comportam quando submetidos a condições de trabalho e ao desgaste. O desgaste é um fator predominante no controle da vida útil de um componente mecânico. Para melhorar as características das peças submetidas ao desgaste, a técnica de revestimento duro aplicado por soldagem a arco elétrico é amplamente utilizada. Nesse sentido, as ligas a base de FeCrC, devido a presença de grande quantidade de carbonetos duros dispersos em sua matriz, melhoram a resistência ao desgaste do material quando aplicadas como revestimentos duros. O teor de carbono presente na liga tem papel fundamental na melhoria da resistência ao desgaste, sendo que quanto maior o teor de carbono, menor o volume de desgaste. Por outro lado, ao avaliar o comportamento das ligas FeCrC em altas temperaturas, o comportamento do desgaste sofre instabilidade. O principal modo de desgaste observado nas ligas a base de FeCrC é o desgaste abrasivo e um dos principais métodos de ensaio utilizados para simular condições reais de trabalho dos componentes mecânicos é o abrasômetro de roda de borracha.

Palavras-chave: Modos de Desgaste. Revestimento Duro. FeCrC. Desgaste Abrasivo.

1 INTRODUÇÃO

Os modos de desgaste descrevem a forma como ocorrem as interações energéticas e interações entre materiais de um sistema tribológico. O movimento relativo entre as superfícies de contato do sistema é utilizado para classificar o tipo de mecanismo. Para avaliar estes mecanismos,

diferentes técnicas são utilizadas em laboratório. A grande variedade de técnicas existentes é devido ao grande número de sistemas de desgastes encontrados na prática (Zum Gahr, 1987).

O desgaste pode ocorrer danificando a superfície e/ou através da retirada de material. Os mecanismos de desgaste podem ser classificados de diferentes formas, todavia, avaliando os mecanismos apresentados na literatura, eles podem ser reduzidos a quatro grupos básicos, sendo eles, desgaste por adesão, desgaste por abrasão, fadiga superficial e reações termoquímicas. A deformação plástica também tem papel importante no processo de desgaste, porém não é considerada um mecanismo de desgaste (Zum Gahr, 1987).

Estudos laboratoriais buscam examinar como os mecanismos de desgaste acontecem, simulando aplicações práticas para fornecer informações úteis de taxa de desgaste e coeficiente de atrito. Por isso, selecionar adequadamente as variáveis que influenciam o processo de desgaste, bem como controlar e monitorar cada uma delas, é extremamente importante. O teste feito em laboratório deve levar em conta fatores como o material das superfícies, suas geometrias, o carregamento e a pressão de contato, a velocidade de deslizamento e o ambiente (Hutchings; Shipway; 2017).

Todos esses aspectos devem ser considerados e justificados na realização do ensaio. É importante lembrar que o comportamento tribológico do contato depende do comportamento de todo o sistema e não só do comportamento do material. É por esta razão que uma compreensão dos mecanismos de desgaste é essencial, uma vez que, isso permite que as conclusões sejam extrapoladas de forma confiável para além dos limites estabelecidos pelas condições do ensaio (Hutchings; Shipway; 2017).

O desgaste é um fator predominante que controla a vida útil de componentes mecânicos. Peças metálicas muitas vezes perdem seu uso não devido à quebra, mas porque sofrem desgaste que causam a perda de sua geometria e funcionalidade. Em geral, a maioria das partes não falham por apenas um modo de desgaste, mas devido a uma combinação deles (Pradeep, Ramesh, Prasad, 2010).

Diversas pesquisas são desenvolvidas ao longo dos anos para tentar reduzir o desgaste sofrido por componentes mecânicos. Uma das formas estudadas é o melhoramento da resistência ao desgaste através da adição de um material resistente ao desgaste. Nesse sentido, a técnica de revestimento duro se tornou uma das mais avaliadas para aplicações resistentes ao desgaste (Pradeep, Ramesh, Prasad, 2010).

A escolha da liga para revestimento, deve levar em conta sua soldabilidade, custo e compatibilidade metalúrgica (Buchanan; Shipway; McCartney, 2007). As ligas de FeCrC contendo boa concentração de cromo e carbono, e microestrutura com grande quantidade de carbonetos duros, são muito usadas no processo de soldagem a arco, devido a sua grande resistência ao desgaste (Atamert; Bhadeshia, 1990). Por outro lado, a aplicação destas ligas no revestimento de componentes sujeitos a certo grau de impacto é algo limitado visto que, elas contêm grandes carbonetos de cromo duros e frágeis que durante o processo de desgaste são removidos da matriz (Corrêa et al, 2006).

Neste contexto, as ligas com base em FeCrC são amplamente utilizadas quando se deseja aumento de resistência ao desgaste. Assim, o objetivo deste trabalho é levantar as principais informações sobre essa classe de materiais quando submetidas ao desgaste, especialmente quando utilizadas a partir de arames para deposição por soldagem a arco elétrico.

2 DESENVOLVIMENTO

Durante o desgaste adesivo ocorre a formação e quebra de ligações nas interfaces. Esse tipo de desgaste ocorre quando há deslizamento de uma superfície contra outra. Durante o movimento relativo entre as faces em contato, acontece a ruptura dessas juntas e a transferência de material entre as superfícies em contato. A fadiga superficial corresponde a formação de rachaduras e fadiga na superfície do material associado a ciclos tribológicos de estresse, que resultam na remoção de material. Essa fadiga superficial é causada por ciclos alternados de carregamentos sobre a superfície sólida. A reação triboquímica diz respeito a reações químicas formadas como produto de interações químicas entre os elementos do sistema tribológico (Zum Gahr, 1987).

Já no desgaste abrasivo, ocorre a remoção de material devido a arranhões nas superfícies. Essa remoção de material é devido a presença de protuberâncias ou partículas duras em pelo menos uma das superfícies em contato. O desgaste abrasivo pode ser classificado em abrasão de dois ou três corpos. No desgaste abrasivo de dois corpos, as partículas se movem livremente sobre a superfície do material semelhante a areia deslizando por uma superfície inclinada. No desgaste abrasivo de três corpos, as partículas atuam na interface entre o material sólido e o anteparo (Zum Gahr, 1987). De forma geral, ao avaliar os modos de desgaste que ocorrem em situações de trabalho de diferentes componentes mecânicos o principal mecanismo identificado é a abrasão.

A técnica de revestimento duro é um dos métodos mais econômicos e convenientes para melhorar o desempenho de componentes submetidos ao desgaste. Em um estudo realizado para comparar a microestrutura e a resistência a abrasão de revestimentos à base de FeCrC, verificou-se que a resistência ao desgaste é determinada pelo tamanho, forma, distribuição e composição química dos carbonetos, bem como pela microestrutura da matriz (Buchely, et al, 2005).

Em ligas de FeCrC depositadas através do processo de soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido, o volume elevado de carbonetos M_7C_3 forneceram uma barreira contra indentações, ranhuras e cortes. Em testes realizados através do ensaio de roda de borracha, os melhores resultados com relação a resistência a abrasão foram obtidos na terceira camada depositada, a qual apresenta microestruturas compostas por uma matriz eutética e carbonos primários M_7C_3 ou MC . Neste mesmo ensaio, observou-se que o modo de desgaste predominantemente encontrado na superfície do material é a abrasão e o micromecanismo de desgaste por microcorte da matriz, além da fratura frágil dos carbonetos (Buchely, et al, 2005).

O desgaste sofrido por revestimentos depositados por soldagem a arco transferido por plasma (PTA) aplicados a ferramentas específicas de preparação do solo em implementos agrícolas foi avaliado. Nessa situação, o desempenho, quanto à resistência à abrasão, de revestimento de FeCrC com adição de vanádio, foi testado e se mostrou seis vezes mais resistente do que o aço comercial. As superfícies das amostras testadas foram analisadas através de microscopia eletrônica de varredura que identificou o mecanismo de desgaste por abrasão como predominante (Passos, 2022). A Figura 1, apresenta a imagem obtida da superfície dos revestimentos.

As superfícies foram desgastadas através do ensaio por roda de borracha. As partículas brilhantes correspondem às partículas abrasivas e em contraste, as manchas mais escuras mostram oxidação e carbonetos de vanádio. Quando o teste de abrasão foi realizado com partículas maiores (#50) para as duas cargas aplicadas, o micromecanismo de desgaste aparenta ser o microcorte. Existe a formação de alguns sulcos rasos quando o teste foi realizado com abrasivo menor (#100). Entretanto, o micromecanismo de desgaste predominante aparenta ser a abrasão por rolamento devido a microindentações. Ainda, nesta condição de ensaio, é possível que ocorra o rolamento de partículas abrasivas entre a amostra e a roda de borracha. Vale ressaltar que, nestas condições de teste, os revestimentos apresentam maior resistência relativa ao desgaste (Passos, 2022).

Durante o ensaio realizado no abrasômetro tipo roda de borracha, as partículas abrasivas soltas e secas, interagem de diferentes formas com as amostras. As partículas podem aderir à borracha e sulcar a superfície da amostra ou podem rolar entre a roda de borracha e a amostra e causar deformações plásticas na superfície da amostra. A dinâmica das partículas depende da

combinação de diversos fatores, incluindo o atrito entre a superfície e as partículas, dureza relativa, tamanho das partículas e a carga normal. Essa transição nos mecanismos de desgaste também será influenciada pela microestrutura e dureza da amostra, e a presença de carbonetos tende a desviar ou mesmo interromper completamente os sulcos dos abrasivos (Passos, 2022).

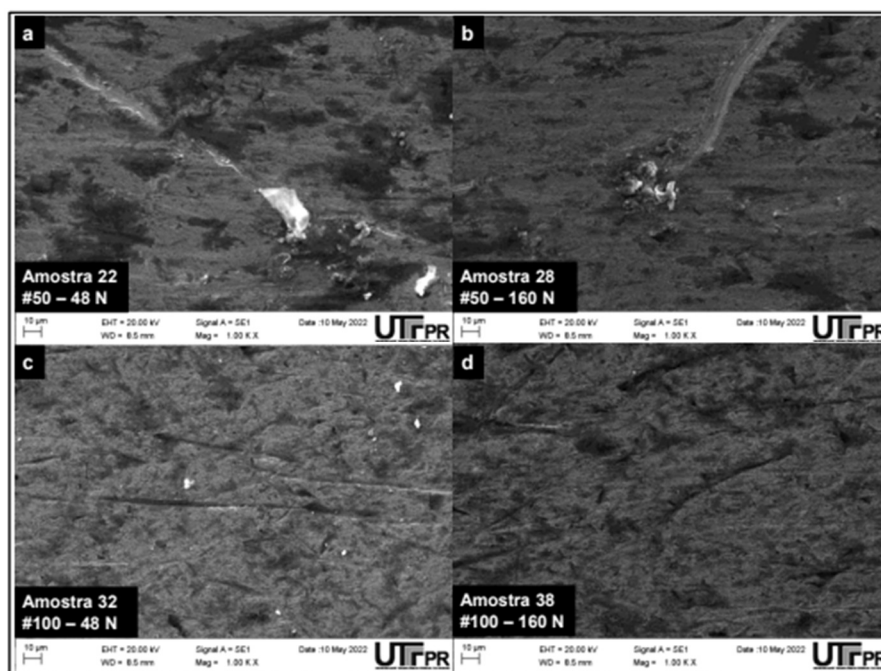


Figura 1. Imagem de MEV por SEI dos revestimentos FeCrC-V (12,5mm) ensaiados com abrasivo #50 com carga 48 N (a), e carga 160 N (b), abrasivo #100 carga 48 N (c) e carga 160 N (d) (Passos, 2022)

Ao avaliar a microestrutura e as características abrasivas de revestimentos a base de FeCrC é possível identificar diferentes níveis de desgaste das ligas com diferentes teores de carbono. Através do ensaio por abrasômetro de borracha, é possível identificar que a perda por desgaste diminui com o aumento do teor de carbono. A maior presença de carbonetos primários na matriz é capaz de proteger as colônias eutéticas dos danos causados por partículas abrasivas. Sendo assim, o aumento do teor de carbono poderia melhorar a resistência ao desgaste de ligas à base de FeCrC (Chang, et al, 2010). A Figura 2 apresenta a perda por desgaste de ligas a base de FeCrC, sendo A, B e C, ligas de baixo, médio e alto teor de carbono respectivamente.

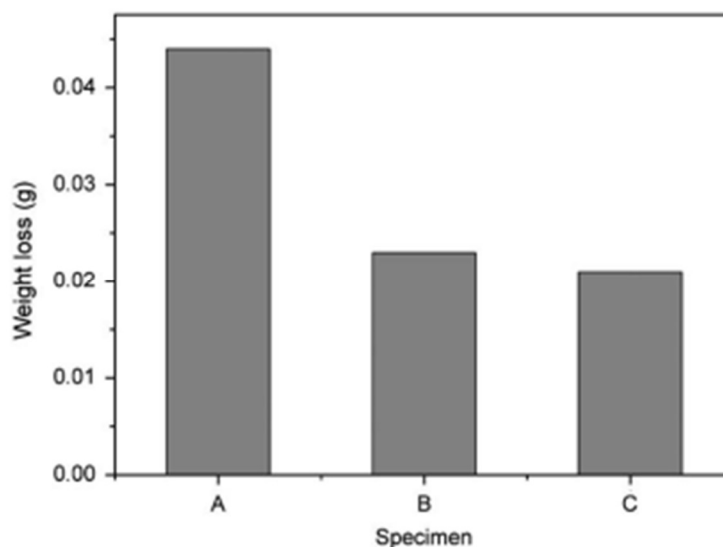


Figura 2. Perda de massa por desgaste nas amostras (Chang, et al, 2010)

Em relação a características abrasivas de revestimentos a base de FeCrC, Chang et al (2010), verificaram que a resistência ao desgaste das ligas estava relacionada a fração de carbonetos primários $(Cr,Fe)_7C_3$ e que o modo de desgaste também estava diretamente ligado a essa fração. Uma quantidade menor de carbonetos primários, resultam em arranhões contínuos na superfície enquanto a formação de crateras se dava pela fratura dos carbonetos. Com o aumento do número de carbonetos, os arranhões na superfície tornavam-se descontínuos. A Figura 3 apresenta a superfície dos revestimentos para diferentes percentuais de carbono.

Revestimentos a base de FeCrC, quando avaliados quanto a sua estabilidade micromecânica em altas temperaturas apresentaram uma perda significativa de resistência ao desgaste. Esse aumento no volume de desgaste que ocorre nesse tipo de revestimento quando avaliado à temperatura de 500°C, pode ser observado pelo aumento do desvio padrão experimental. Isso demonstra a instabilidade do material quando submetido a condições abrasivas em altas temperaturas e como resultado tem-se o desgaste descontrolado do material. Nessa situação foi avaliado o desempenho de uma liga de FeCrC simples e uma complexa com adição de molibdênio, tungstênio e nióbio depositadas por soldagem a arco. A liga complexa apresenta melhores resultados e um volume de desgaste menor. A Figura 4 apresenta o gráfico de volume de desgaste em função da temperatura (Rojacz, et al, 2023).

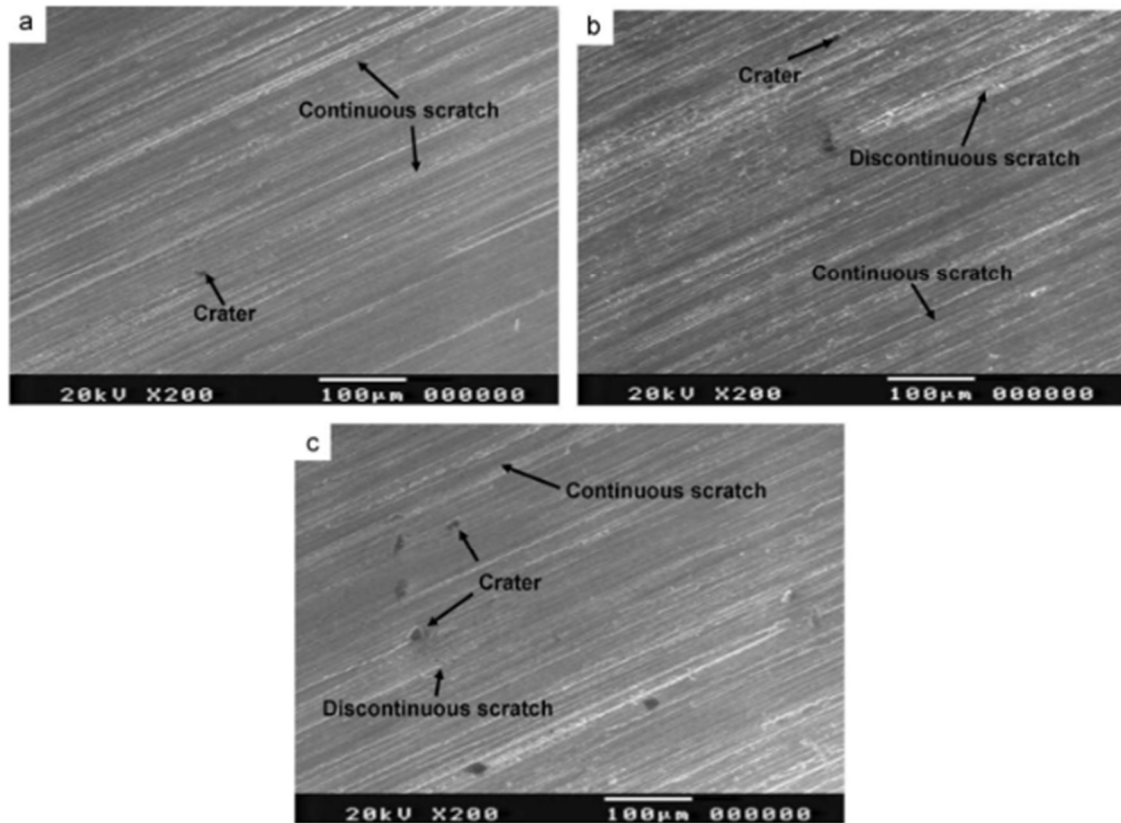


Figura 3. Desgaste superficial de ligas de revestimento duro com diferentes teores de C: (a) 3,61%, (b) 4,47% e (c) 5,21% (Chang, et al, 2010)

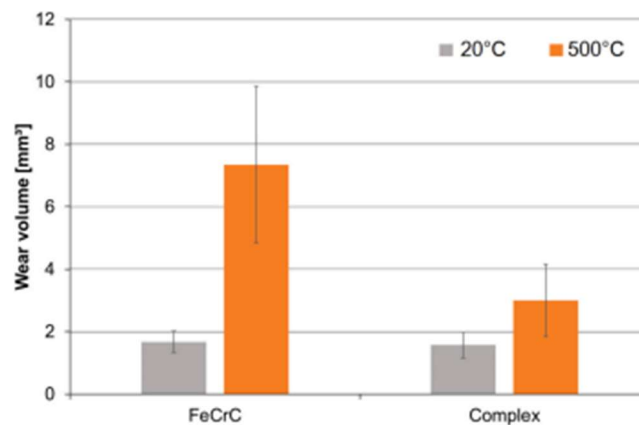


Figura 4. Volume de desgaste por Temperatura (Rojacz, et al, 2023)

Diversos fatores influenciam o comportamento do desgaste em tribossistemas. O parâmetro mais amplamente utilizado quando se trata de desgaste abrasivo é a dureza do material. Quando avaliados diferentes revestimentos a base de FeCrC, existe uma tendência de amolecimento do

material em altas temperaturas. Nesses revestimentos, o desgaste é menor quando a dureza é maior. A Figura 5 mostra o gráfico de dureza versus volume de desgaste (Rojacz, et al, 2023).

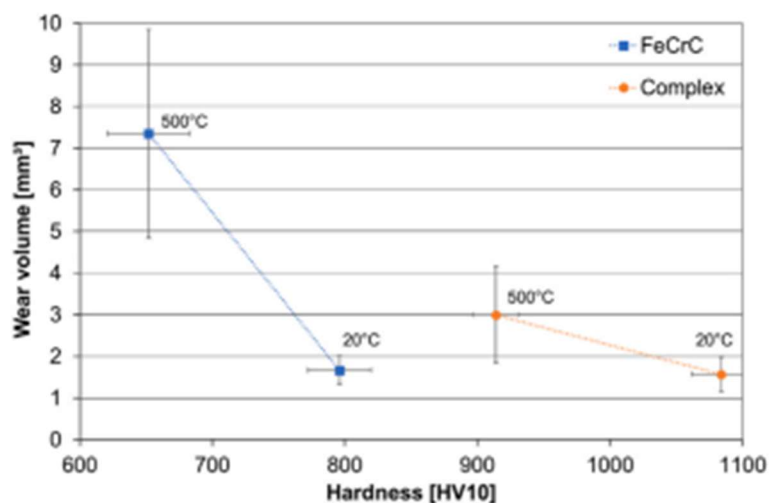


Figura 5. Gráfico de Dureza *versus* Volume de Desgaste (Rojacz, et al, 2023)

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os estudos analisados avaliaram o comportamento de ligas a base de FeCrC submetidas a condições de desgaste. No geral o mecanismo de desgaste predominante é o desgaste abrasivo, sendo o ensaio de abrasômetro de roda de borracha o método mais usado. Esse tipo de ensaio possibilita reproduzir as condições de trabalho dos componentes mecânicos expostos ao desgaste, possibilitando obter dados comparativos sobre o desempenho real dessas ligas.

Os resultados apresentados, demonstram que a técnica de revestimento duro, é uma estratégia eficaz para melhorar a resistência ao desgaste dos materiais. Quando comparadas ao aço carbono comum, as ligas a base de FeCrC apresentam um desempenho superior, com valores para volume de desgaste menores. O teor de carbono também influencia as perdas de massa por desgaste, sendo que quanto maior o teor de carbono, menores são as perdas. A presença de outros elementos de liga como o vanádio, nióbio, entre outros, contribui para a resistência ao desgaste do material. Isso porque, os carbonetos formados e dispersos na matriz reduzem o volume de desgaste.

As ligas FeCrC se tornam mais instáveis, resultando no desgaste descontrolado do material quando em alta temperatura. No entanto, a liga com adição de molibdênio, tungstênio e nióbio apresenta resultados melhores quanto ao volume de desgaste. Isso se deve a melhor estabilidade dos carbonetos formados. Avaliando o comportamento desses revestimentos submetidos a alta

temperatura, é possível identificar que quanto maior a dureza do material, menores as perdas por desgaste.

4 CONCLUSÕES

Os artigos avaliados na presente revisão permitem concluir que:

- A microestrutura das ligas a base de FeCrC é formada principalmente por uma matriz eutética com carbonetos primários $(Cr,Fe)_7C_3$;
- As ligas a base de FeCrC tem sua resistência ao desgaste ligada principalmente à formação de carbonetos duros, sendo que quanto maior o número de carbonetos na matriz, menor o desgaste sofrido pela superfície do material;
- Um dos modos de desgaste mais encontrados em revestimentos duros à base de FeCrC é o desgaste por abrasão com micromecanismo de desgaste por microcorte;
- O ensaio por abrasômetro de roda de borracha é amplamente utilizado para simular as reais condições de trabalho dos componentes mecânicos sujeitos ao desgaste por abrasão;
- Na condição de alta temperatura, os revestimentos a base de FeCrC, apresentam o aumento do desgaste por abrasão;
- A dureza do revestimento a base de FeCrC é um dos fatores que está diretamente ligado a resistência ao desgaste, sendo que quanto maior a dureza, menor as perdas por desgaste.

REFERÊNCIAS

- ATAMERT, S.; BHADESHIA, H. K. D. H. Microstructure and Stability of Fe-Cr-C Hardfacing Alloys. *Materials Science and Engineering*, A130, p. 101-111, 1990.
- BUCHANAN, V. E.; SHIPWAY, P. H.; MCCARTNEY, D. G. Microstructure and Abrasive Wear Behaviour of Shielded Metal Arc Welding Hardfacings Used in the Sugarcane Industry. *Wear* 263. p. 99-110, 2007.
- BUCHELY, M. F.; GUTIERREZ, J. C.; LEON, L.M.; TORO, A. The effect of microstructure on abrasive wear of hardfacing alloys. *Wear* 259. p. 52-61, 2005.
- CHANG, C.M.; CHEN, Y.C.; WU, W. Microstructural and Abrasive Characteristics of High Carbon Fe-Cr-C Hardfacing Alloy. *Tribology International* 43. p. 929-934, 2010.
- CORRÊA, E.O.; de ALCÂNTARA, N. G.; TECCO, D. G.; KUMAR, R. V. Avaliação da Resistência ao Desgaste de Ligas Fe-Cr-C-NB-V Desenvolvidas para Solda de Revestimento Duro para Uso sob Condições Altamente Abrasivas. IV Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. Recife - PE, 2006.
- HUTCHINGS, I.; SHIPWAY, P. *Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials*, Second Edition. Elsevier Ltd, 2017.
- PASSOS, T. A. Desgaste Abrasivo de Revestimentos Depositados por Soldagem a Arco Transferido por Plasma (PTA) para Uso em Implementos Agrícolas. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba. 2022
- PRADEEP, G.R.C.; RAMESH, A.; PRASAD, B.D. A Review Paper on Hardfacing Processes and Materials.

ROJACZ, R.; KATSICH, C.; VARGA, M.; BADISCH, E. How the Micro-mechanical Stability of Carbides in Chromium-rich Hardfacings Influences the Impact-abrasion Resistance at Elevated Temperatures. *Wear*, 522. 2023.

ZUM GAHR, K. H. *Microstructure and Wear of Materials*. Elsevier, 1987.



SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE CONVECÇÃO FORÇADA EM CAVIDADES QUADRADAS COM O USO DO SOFTWARE OPENFOAM®

¹ Hugo K. Noel, ¹ Felipe P. Mariano, ¹ Andreia A. Nascimento

¹ Laboratório de Engenharia Térmica e de Fluidos (LATEF), Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC), Universidade Federal de Goiás (UFG)
Av. Esperança, Campus Samambaia, Al. Ingá, Prédio B5, 74.690-900 – Goiânia/Goiás, Brasil.

fpmariano@ufg.br, aanascimento@ufg.br

DOI: 10.5281/zenodo.19041524

Resumo. No presente trabalho, objetiva-se utilizar modelos numéricos do software OpenFOAM capazes de simular o comportamento da dinâmica da movimentação de ar em espaços refrigerados e climatizados. Metodologicamente, foram formuladas equações de balanço de massa, quantidade de movimento linear e energia, incluindo modelos de turbulência quando necessários. Dois casos-teste presentes na literatura, cavidades com escoamento laminar e turbulento foram utilizados para validar os modelos utilizados. Os resultados indicam que a modelagem computacional permite prever com fidelidade a distribuição de temperatura, velocidade e pressão, bem como estimar o desempenho energético dos equipamentos. Conclui-se que o OpenFOAM® é uma ferramenta robusta para simular sistemas de Aquecimento, Ventilação, Ar-Condicionado e Refrigeração (HVAC-R) e que a abordagem adotada pode auxiliar na concepção de projetos e dimensionamento de equipamentos mais eficientes e na minimização dos impactos ambientais.

Palavras-chave: OpenFOAM. Dinâmica dos Fluidos Computacional. Escoamentos em cavidades quadradas.

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por soluções eficientes e sustentáveis no setor de climatização, tanto em sistemas de refrigeração quanto de ar-condicionado, tem impulsionado o desenvolvimento de novas tecnologias e a otimização dos processos existentes. Estes sistemas desempenham um papel

crucial em diversas indústrias, como alimentícias, de saúde e transporte, e são responsáveis por grande parte do consumo energético em edificações comerciais, industriais e residenciais. Em face dos desafios globais relacionados à eficiência energética e à sustentabilidade, a otimização de sistemas de refrigeração e ar-condicionado tornou-se um dos focos de pesquisa e desenvolvimento no campo da engenharia térmica e de fluidos.

O uso de softwares de simulação, como o OpenFOAM, que é uma ferramenta para a dinâmica dos fluidos computacional (DFC) livre, aberta e gratuita, pode ser utilizado para estudar e otimizar o comportamento desses sistemas, proporcionando um ambiente virtual onde diferentes configurações podem ser testadas sem a necessidade de produzir protótipos físicos dispendiosos.

Os sistemas tradicionais de climatização e refrigeração, embora eficazes, enfrentam limitações em termos de eficiência energética, controle preciso de temperaturas e integração com fontes renováveis de energia. Neste contexto, a modelagem computacional tem se mostrado uma ferramenta poderosa para a análise, simulação e otimização desses sistemas, permitindo não apenas a análise de desempenho, mas também a identificação de melhorias que podem ser implementadas nos projetos e nas operações desses sistemas.

O uso de ferramentas de simulação computacional, como o OpenFOAM, permite uma análise detalhada do comportamento de escoamentos de fluidos nos sistemas de refrigeração e ar-condicionado, o que seria difícil ou até mesmo impossível de realizar de maneira experimental ou prática em condições reais. Além disso, a modelagem computacional oferece a possibilidade de realizar testes em diferentes cenários operacionais, otimizando o processo sem a necessidade de modificações físicas, as quais costumam ser dispendiosas, nos sistemas. Este tipo de abordagem não só contribui para a redução dos custos de desenvolvimento, mas também promove a inovação em tecnologias mais eficientes e sustentáveis.

Além disso, a utilização de softwares como o OpenFOAM para otimizar sistemas de refrigeração e ar-condicionado está alinhada com as tendências atuais de digitalização e automação na engenharia. Com o aumento da complexidade dos sistemas modernos e a necessidade de um controle preciso de suas operações, a modelagem computacional se torna uma ferramenta indispensável para engenheiros e pesquisadores. A pesquisa proposta, portanto, contribui para o avanço do conhecimento na área de sistemas de climatização e refrigeração.

2 METODOLOGIA

2.1 Convecção forçada em regime laminar

A geometria da cavidade, as condições de contorno e os parâmetros físicos considerados nas simulações do presente artigo foram implementados de acordo com as mesmas configurações de Mioralli et al. (2017), para assim, proceder com a comparação e validação dos resultados. A cavidade modelada é exposta na Figura 1, tem relação altura(H)/largura (L) unitária, e um sistema adicional de coordenadas “ S ” é proposto para determinar os cantos da cavidade. Sendo assim, a parede esquerda da cavidade denominada “A” está no intervalo $S = 0 - 1$, o piso denominado parede “B” está no intervalo $S = 1 - 2$, a parede direita, denominada “C” está no intervalo $S = 2 - 3$, e por último, o teto denominado parede “D” está no intervalo $S = 3 - 4$.

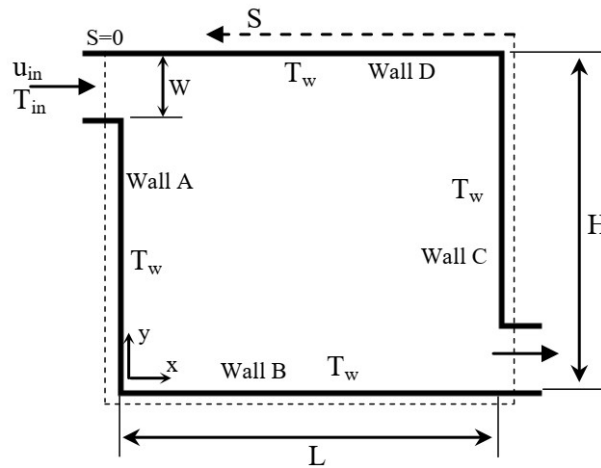


Figura 1. Esboço da cavidade (MIORALLI, 2017)

O escoamento foi assumido bidimensional, incompressível, permanente e laminar, com temperatura ($T_{entrada}$) igual a 299 K, e velocidade de entrada ($u_{entrada}$) igual a 1,0 m/s. As condições de contorno iniciais determinam a temperatura (T_w) no interior da cavidade, assim como das paredes, assumidas isotérmicas, igual a 300 K. A entrada do escoamento tem dimensão de 0,25 m e situada no canto superior esquerdo, já a saída, com a mesma dimensão, foi situada no canto inferior direito.

Assim, com as considerações físicas e condições de contorno do problema delimitadas, optou-se pelo uso do algoritmo “buoyantSimpleFoam” para a solução numérica das equações de continuidade, Navier-Stokes e da Energia (Çengel, 2007 e Silveira-Neto, 2020). De acordo com o material de apoio de OpenFOAM (2025) esse algoritmo foi desenvolvido para solucionar

escoamentos permanentes, compressíveis e turbulentos podendo ser aplicado em casos de ventilação e refrigeração. Portanto, um passo importante da metodologia empregada concentrou-se em avaliar se este algoritmo resolveria satisfatoriamente o problema a ser validado, sendo este, incompressível e laminar.

De acordo com Mioralli et al. (2017) a independência da malha foi obtida com uma malha de 160 x 160 volumes no total dos quatro blocos, onde observou-se uma relação aceitável entre os tempos computacionais de simulação e resultados confiáveis. No presente estudo, com o intuito de avaliar a independência da malha gerada no OpenFoam, optou-se por um refinamento gradual, bidimensional e uniforme das dimensões da malha, sendo que, a primeira malha simulada teve dimensões 40 x 40, sendo incrementada posteriormente para 80 x 80, 160 x 160 e finalmente 320 x 320 volumes.

No trabalho de Mioralli et al. (2017) os parâmetros que são variados a fim de observar o desenvolvimento do escoamento são os números de Reynolds (Re) e de Prandtl (Pr), obtendo-se seis variações possíveis para as simulações. Então, para cada combinação de Re e Pr, são gerados graficamente os campos de velocidade, de temperatura e as linhas de corrente para visualização do comportamento de cada escoamento simulado.

2.2 Convecção forçada em regime turbulento

Nesta seção, foi realizada uma comparação dos resultados obtidos no presente trabalho com os dados experimentais e numéricos disponíveis em Youssef et al. (2016), que investigaram o desempenho de sistemas de ar-condicionado em um ambiente bidimensional utilizando o software ANSYS Fluent.

A sala modelada por Youssef et al. (2016), vide Figura 2, tem altura de 2,44 m e largura de 2,44, uma entrada de ar situada no canto superior esquerdo definida com 2,1 cm, e uma saída de ar localizada no canto inferior direito definida com 8,0 cm. Além disso, a parede esquerda da cavidade é denominada por “Wall 1”, a parede direita denominada por “Wall 2”, o piso denominado por “Floor” e o teto por “Celling”.

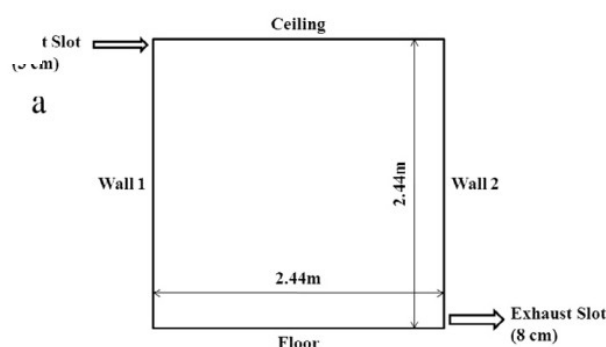


Figura 2. Esboço da sala (YOUSSEF, 2016)

A velocidade de entrada do ar $u_{entrada}$ foi definida em 0,80 m/s, a temperatura do ar de entrada $T_{entrada}$ foi definida em 10 °C. O fluxo térmico foi definido em 25 W/m² através das paredes e 60 W/m² através do teto. Os modelos de turbulência utilizados nas simulações foram configurados de acordo com as especificações do estudo de Youssef et al. (2016). Isso envolveu a escolha do modelo RNG $k - \epsilon$, que é adequado para simulações de escoamentos turbulentos com gradientes térmicos significativos.

De acordo com Youssef et al. (2017) a independência da malha foi obtida com uma malha de 44 x 44 volumes não uniformemente distribuídos, onde observou-se uma relação aceitável entre os tempos computacionais de simulação e resultados confiáveis. No presente estudo, com o intuito de avaliar a independência da malha gerada no OpenFoam, optou-se por um refinamento, bidimensional e uniforme das dimensões da malha, sendo que, a primeira malha simulada foi de 176 x 176 e finalmente 352 x 352 volumes.

A temperatura inicial da sala é imposta com o valor de 300 K. Adicionalmente, adota-se para as paredes uma condição de não escorregamento, ou seja, a velocidade tende a zero na interface do escoamento com a cavidade. Para a pressão, adota-se um campo inicial igual à pressão atmosférica.

Para as configurações de turbulência adotou-se o modelo de turbulência RNG $k - \epsilon$ com os coeficientes apresentados na Tab. 1.

Tabela 1. Coeficientes do modelo de turbulência

Modelo	C_μ	C_1	C_2	C_3	β	η_0	σ_k	$[(\sigma_\epsilon)]$
RNG k- ϵ	0,0845	1,42	1,68	0,00	0,012	4,39	0,7194	0,7194

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Convecção forçada em regime laminar

A análise dos resultados obtidos consistiu na comparação entre as linhas de corrente geradas pela simulação do modelo deste estudo, implementada no algoritmo “*buoyantSimpleFoam*”, com as linhas de correntes apresentadas por Mioralli et al. (2017). As linhas de corrente mostradas na Figura 3 são dos escoamentos com número de Reynolds 50, 100 e 500, todos com o número de Prandtl igual a 5,0.

Na análise comparativa entre as linhas de corrente geradas pelas simulações destas simulações, mostra-se que elas são similares àquelas produzidas por Mioralli et al. (2017). O incremento do número de Reynolds revelou o aumento das recirculações nos cantos inferior esquerdo e superior direito, assim como, o surgimento de uma recirculação maior na parte central da cavidade, para Reynolds 100 e 500 em consonância com Mioralli et al. (2017).

Nos campos de velocidade obtidos, demonstra-se a presença de maiores magnitudes de velocidade ao longo do escoamento de ar, que entra pela parte superior da cavidade e sai através do canto inferior esquerdo. Para Reynolds 50, as componentes da velocidade têm um decaimento no centro da cavidade, voltando a crescer próximo da saída. Para Reynolds 100 e 500, percebe que o escoamento apresenta menores velocidades nas recirculações e próximo aos cantos da cavidade em conformidade com o que também mostrou Mioralli et al. (2017).

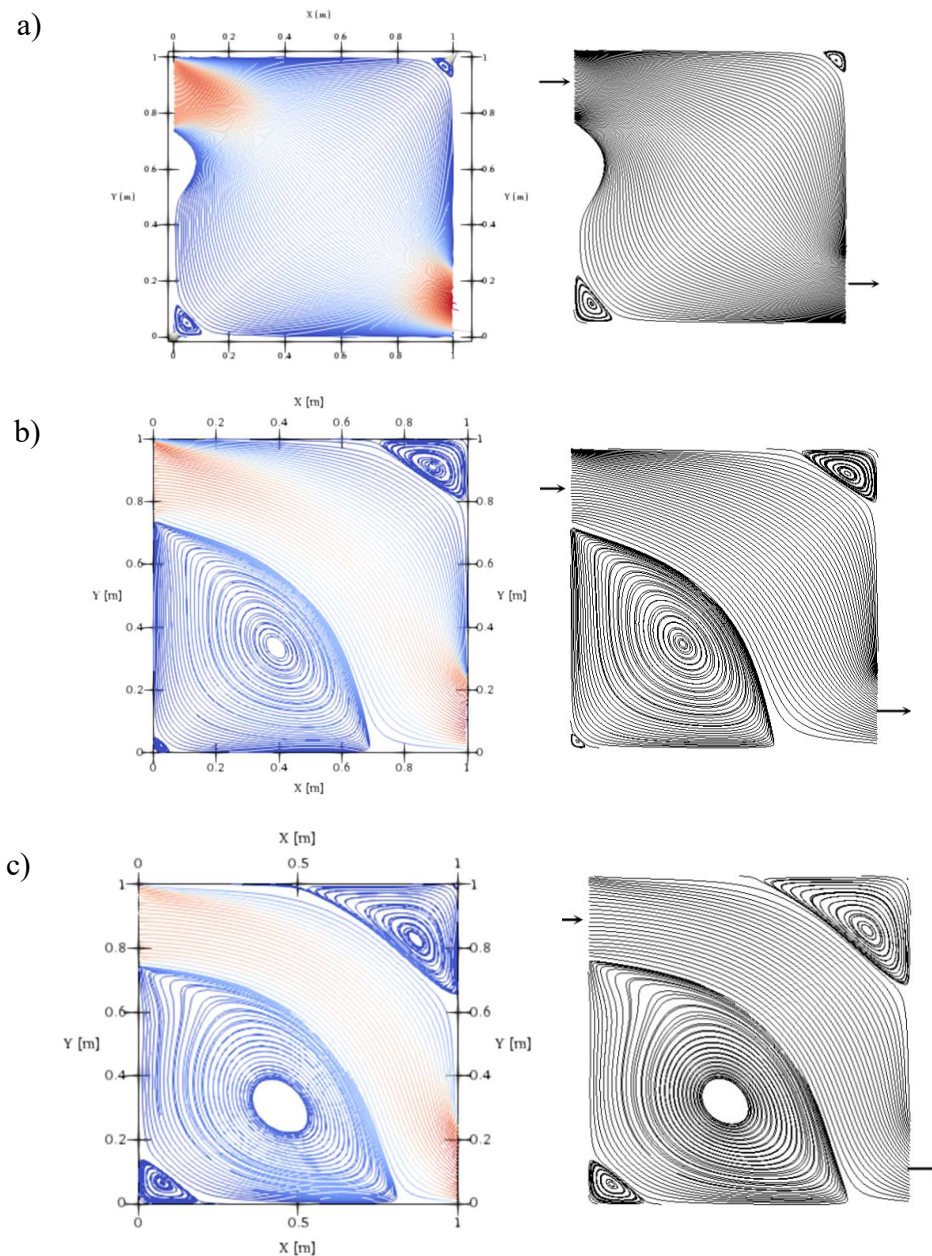


Figura 3. Comparativo entre linhas de corrente, com $Pr=5,0$. Presente trabalho, à esquerda, coloridas com a magnitude de velocidade, Mioralli et al. (2017) à direita. a) $Re = 50$; b) $Re = 100$; c) $Re = 500$. Produzido pelos autores à esquerda e Mioralli et al. (2017) à direita.

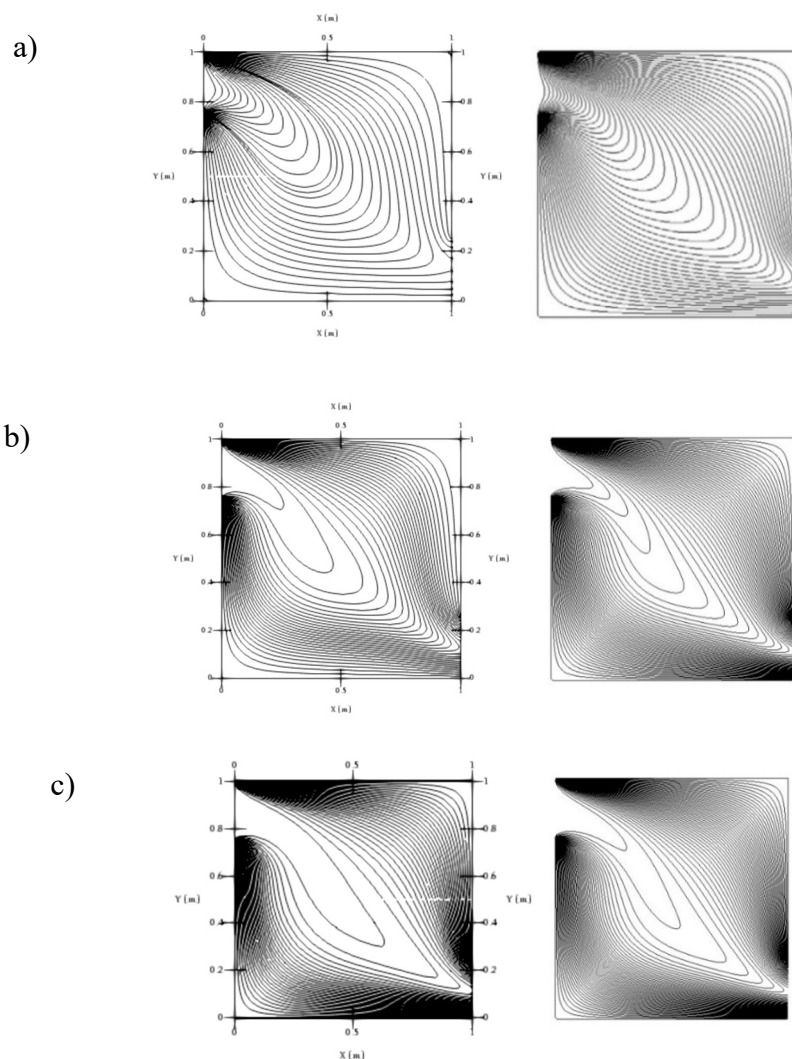


Figura 4. Isocontornos de Temperatura. a) $Re = 50$, $Pr = 0,7$; b) $Re = 50$, $Pr = 3$; c) $Re = 50$, $Pr = 5$. Produzido pelos autores à esquerda e Mioralli et al. (2017) à direita.

Na Figura 4, comparou-se os isocontornos de temperatura obtidos em seis variações entre número de Reynolds e Prandtl simuladas com aqueles disponíveis no trabalho de Mioralli et al. (2017).

Já para $Re = 500$ (Figura 5), o aumento do número de Pr faz com que os gradientes de temperatura se tornem mais intensos, notadamente próximo às paredes e das regiões de entrada e saída. Mioralli et al. (2017) comenta que na zona de interface entre o fluxo de ar e a recirculação central existe um gradiente de temperatura acentuado, o que é um indicativo de troca de energia térmica entre o fluido de entrada e a zona de recirculação.

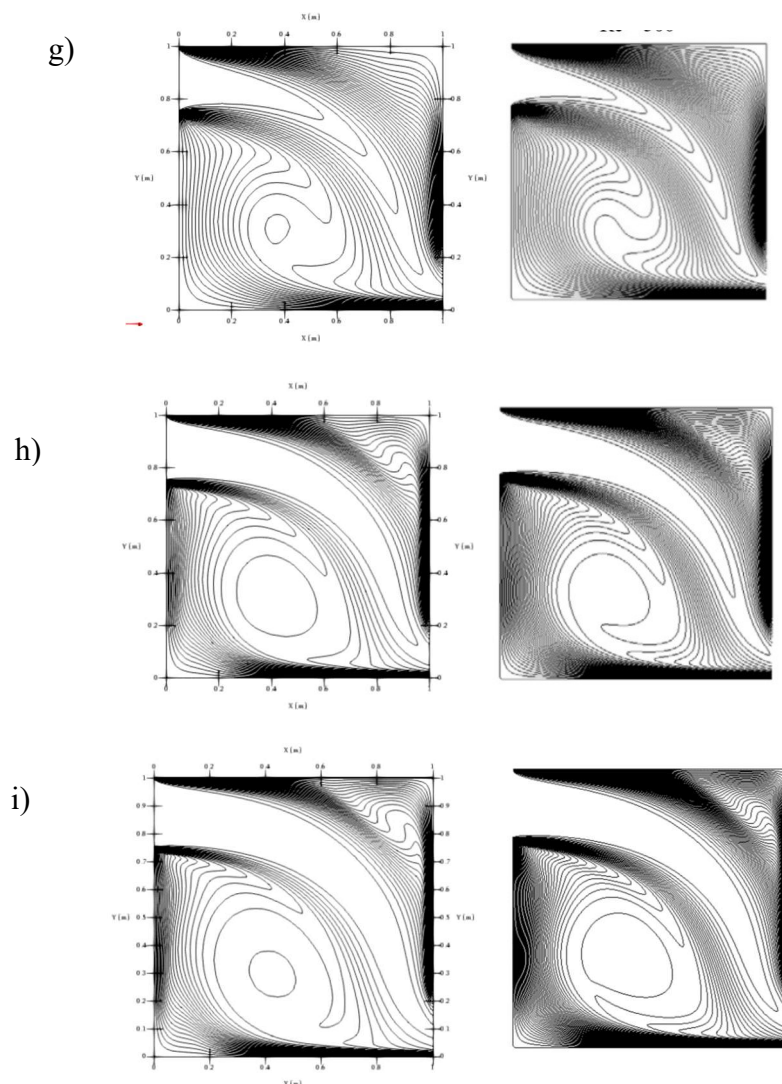


Figura 5. Isocontornos de Temperatura. g) $Re = 500$, $Pr = 0,7$; h) $Re = 500$, $Pr = 3$; i) $Re = 500$, $Pr = 5$. Produzido pelos autores à esquerda e Mioralli et al. (2017) à direita.

3.2 Convecção forçada em regime turbulento

A análise dos resultados obtidos consistiu na comparação entre os perfis de velocidade e temperatura gerados nas simulações do modelo do presente trabalho de escoamentos turbulentos e os perfis apresentados por Youssef et al. (2016). Os perfis de velocidade e temperatura do escoamento são mostrados na Figura 6. A análise comparativa entre os perfis de velocidade e temperatura gerados pelas simulações do presente trabalho mostra similaridade com os resultados obtidos por Youssef et al. (2016) para malhas refinadas com 176×176 e 352×352 volumes.

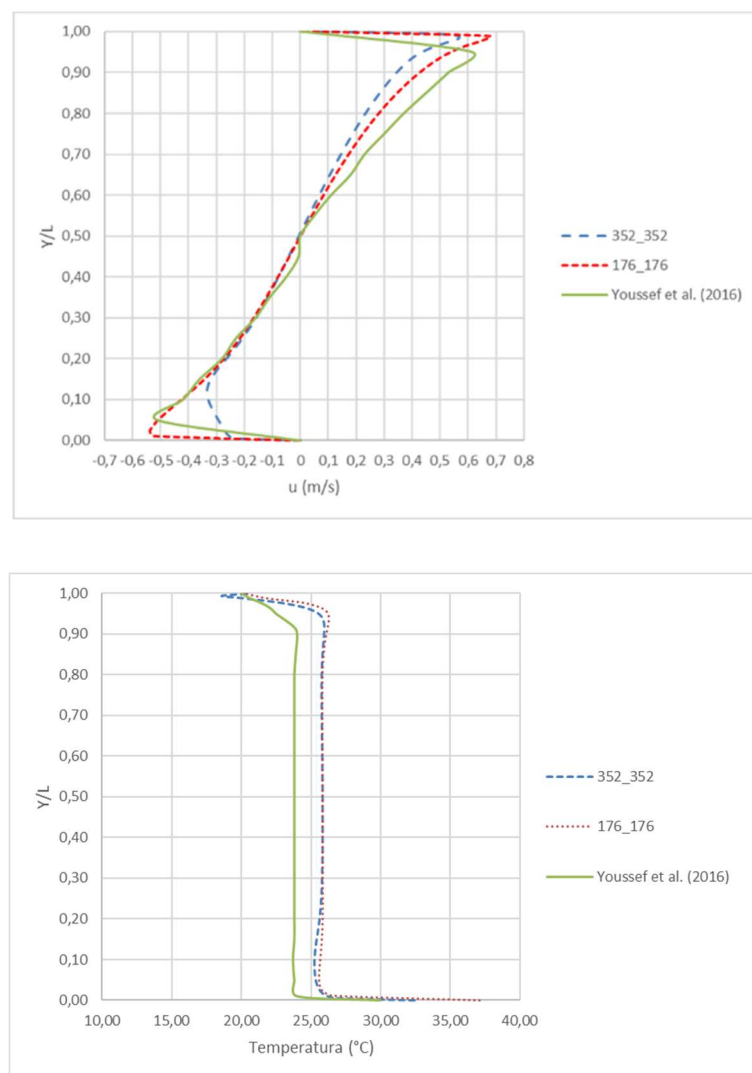


Figura 6. Perfis de velocidade (esquerda) e perfis de temperatura (direita).

O contorno da velocidade média do escoamento dentro da cavidade é apresentado na Figura 7.

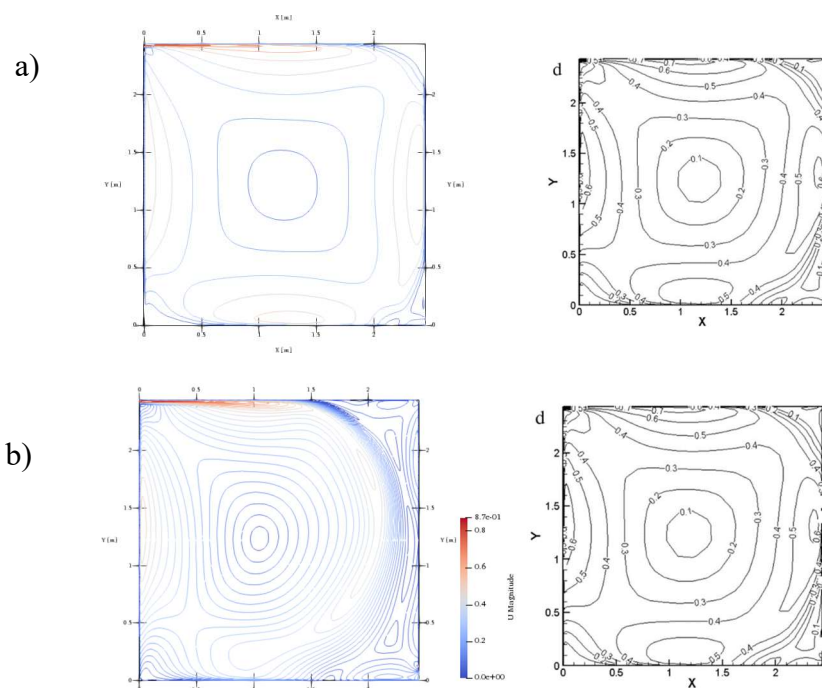


Figura 7. Comparativo das linhas de contorno de velocidade. a) 176 x 176; b) 352 x 352. Produzido pelos autores à esquerda e Youssef et al. (2016) à direita.

Por fim, são comparados os isocontornos de temperatura obtidos nas simulações com aqueles fornecidos por Youssef et al. (2016), Figura 8.

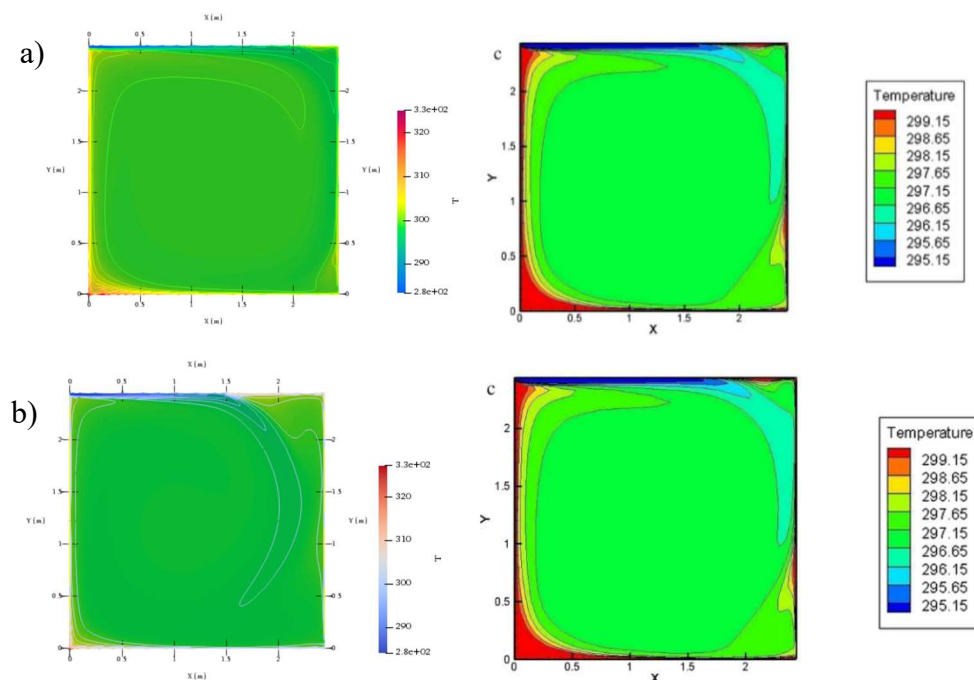


Figura 8. Comparativo das linhas de isocontorno de temperatura. a) 176 x 176; b) 352 x 352. Produzido pelos autores à esquerda e Youssef et al. (2016) à direita.

4 CONCLUSÕES

Os dados obtidos até o presente momento indicam a possibilidade de se investigar mais a fundo a influência do tratamento dado às regiões de interface entre o escoamento e as paredes, com o intuito de entender como o refinamento de malha e o tipo de tratamento de parede para o modelo de turbulência escolhido interferem nos resultados de grandezas tais como: número de Nusselt, fluxo térmico local e coeficiente de transferência de calor por convecção, por exemplo.

Espera-se ainda avançar na otimização desses modelos 2D transientes e turbulentos de resfriamento, através da modificação de parâmetros de posição relativa do objeto em relação as entradas e saída de ar. Para tanto, deve-se utilizar as técnicas de planejamento fatorial. Oportunamente, objetiva-se conseguir avançar para o tratamento das mesmas condições de escoamento, porém em simulações 3D.

REFERÊNCIAS

- MIORALLI, P. C. Analysis of laminar forced convection inside a square ventilated cavity using the OpenFOAM®. *Engenharia Térmica (Thermal Engineering)*, v. 16, n. 1, p. 66–74, 2017.
- YOUSSEF, A. A. et al. Studying comfort in a room with cold air system using computational fluid dynamics. *Ain Shams Engineering Journal*, v. 9, n. 4, p. 1753–1762, 2018.
- ÇENGEL, Y.A. *Mecânica dos Fluidos*. São Paulo, SP, Brasil, McGraw-Hill Ed, 2007.
- SILVEIRA NETO, A. *Escoamentos turbulentos: análise física de modelagem teórica*. Uberlândia, MG, Brasil, Composer Ed, 2020.



UMA REVISÃO SOBRE TURBINAS EÓLICAS DE EIXO HORIZONTAL OFFSHORE

¹ Frederico R. N. Júnior, ¹ Felipe P. Mariano, ¹ Andreia A. Nascimento

¹ Laboratório de Engenharia Térmica e de Fluidos (LATEF), Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC), Universidade Federal de Goiás (UFG), Av. Esperança, s/n, Campus Samambaia, Al. Ingá, Quadra B, bloco 5, s/n, 74690-900, Goiânia/GO, Brasil

fredericojunior@discente.ufg.br, fpmariano@ufg.br, aanascimento@ufg.br

DOI: 10.5281/zenodo.19041534

Resumo. Este artigo apresenta uma revisão não extensiva da literatura sobre turbinas eólicas de eixo horizontal de grande escala aplicadas ao ambiente offshore. Os estudos analisados, em ordem cronológica, abrangem turbinas com potências nominais de 2 MW, 5 MW, 10 MW, 15 MW e 22 MW. Foram comparadas metodologias de simulação que empregam diferentes ferramentas computacionais, como FAST/AeroDyn, HAWC2, Abaqus e o solver híbrido GT-Hybrid, com foco na análise do coeficiente de potência (C_p), razão de velocidade de ponta de pá (TSR), frequências naturais e resposta dinâmica estrutural. Os resultados das referências indicam que as turbinas eólicas atingem valores de C_p na faixa de 0,47 a 0,50, aproximando-se do limite de Betz, e demonstram estabilidade aeroelástica adequada mesmo sob condições ambientais adversas. A revisão também identificou desafios técnicos significativos, como o aumento substancial da massa das pás e as limitações das fundações do tipo monopile para suportar rotores com potências superiores a 15 MW. Conclui-se que, embora o avanço tecnológico e as simulações computacionais tenham permitido o desenvolvimento de turbinas com maior eficiência e confiabilidade, a superação dessas limitações estruturais e a contínua otimização de projetos são essenciais para a viabilidade de turbinas de escala ainda maior.

Palavras-chave: Energia Eólica Offshore, Turbinas de Eixo Horizontal, Simulação Computacional, Coeficiente de Potência (C_p), Análise Aeroelástica.

1 INTRODUÇÃO

O aproveitamento da energia cinética dos ventos remonta à antiguidade, quando moinhos de vento eram utilizados para moagem de grãos e bombeamento de água. A aplicação para geração de energia elétrica dessa fonte surgiu ao final do século XIX, com a construção do gerador eólico de corrente contínua de 12 kW de Charles Brush, e as pesquisas realizadas por Poul la Cour na Dinamarca. No entanto, ao longo do século XX, a geração eólica permaneceu, em grande parte, limitada a aplicações isoladas (Burton, T. et al., 2021).

Em 1941 a turbina eólica Smith-Putman foi desenvolvida, com potência de 1,25 MW e rotor de aço com diâmetro de 53 metros construída nos Estados Unidos, sendo um importante desenvolvimento para área, onde permaneceu como a maior turbina eólica durante 40 anos (Burton et al., 2021).

Em 1981 o setor offshore teve um avanço significativo no desenvolvimento de turbinas eólicas, a construção turbina eólica de eixo horizontal Schachle-Bendix de 3,0 MW. Já em 1991, ocorreu outro importante marco, com a instalação do primeiro parque eólico offshore, composto por 11 turbinas de 450 kW, sendo construída em Vindeby, a 3,0 km da costa da Dinamarca (Burton et al., 2021).

De acordo com o relatório da Global Wind Energy Council (GWEC, 2025), em uma análise de perspectiva futura do tamanho das turbinas offshore, o relatório apresenta uma estimativa para 2030 com rotores estimados de 350 m de diâmetro e potência elétrica de 35 MW (Figura 1).

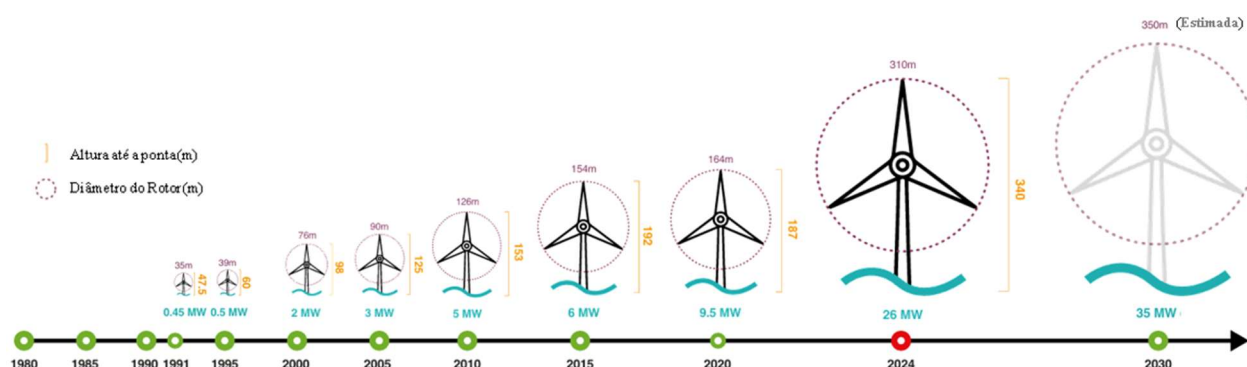


Figura 1. Tendência do tamanho das turbinas offshore – 1980 a 2030 (GWEC, 2025)

O modelo de turbina eólica offshore GWH252-16 MW, de 2022, desenvolvido pela fabricante Goldwind, possui diâmetro de rotor variando entre 252 e 266 metros e capacidade unitária de 13,6 MW a 16,7 MW. Em 2024, no projeto offshore Fujian Zhangpu Liu'ao – Fase II, foram conectadas à rede sete unidades da GWH252-16 MW e treze unidades da GWH252-14,3

MW. O projeto Guangdong Yangjiang Qingzhou – Fase VI prevê a entrada em operação plena em 2025, com a instalação de 74 turbinas GWH252-13,6 MW (GWEC, 2025).

Esse crescimento acelerado da energia eólica offshore tem sido impulsionado por políticas públicas voltadas à transição energética e à segurança energética, bem como pelo avanço tecnológico no desenvolvimento de turbinas de grande porte, com capacidades acima de 15 MW. Ainda de acordo com o relatório da Global Wind Energy Council (GWEC, 2025), instalações industriais na Europa e Ásia já são capazes de fabricar as maiores estruturas offshore em aço.

A relevância desta pesquisa está na crescente demanda global por fontes de energia limpa, aliada ao avanço tecnológico das turbinas eólicas de grande porte, especialmente no ambiente offshore. Nesse cenário, as simulações computacionais tornam-se ferramentas essenciais para o desenvolvimento, otimização e validação de projetos, permitindo análises detalhadas dos escoamentos, das cargas aerodinâmicas e do comportamento operacional em diferentes condições.

Neste contexto, este trabalho tem como objetivo realizar uma revisão da literatura científica que analisa os resultados de simulações numéricas conduzidas por meio de softwares comerciais e de código aberto, aplicadas a modelos de Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal (“Horizontal-Axis Wind Turbine” - HAWT).

2 DESENVOLVIMENTO

O desenvolvimento deste artigo fundamenta-se em uma revisão bibliográfica consistente não extensiva, que aborda conceitos, metodologias e avanços no projeto de turbinas eólicas de eixo horizontal de grande escala para aplicação em ambientes offshore.

Os pesquisadores concentram-se em quatro parâmetros fundamentais para avaliação do desempenho aerodinâmico e integridade estrutural desses sistemas: (i) o coeficiente potência (C_p), que quantifica a eficiência de conversão de energia eólica em energia mecânica; (ii) a razão de velocidade na ponta da pá (“tip-speed ratio” – TSR), determinante para otimização do rendimento operacional; (iii) as frequências naturais dos componentes estruturais, cuja análise previne fenômenos de ressonância; e (iv) a resposta dinâmica estrutural, essencial para garantir a estabilidade aeroelástica sob condições ambientais adversas. A sistematização destas variáveis permite uma avaliação integrada do comportamento operacional das turbinas.

Os trabalhos analisados apresentaram a utilização de um conjunto diversificado de ferramentas computacionais para simulação numérica. Essas ferramentas permitiram aos pesquisadores compararem o desempenho de turbinas que variam de 2,0 MW a 22 MW.

METODOLOGIA

A seleção dos trabalhos pautou-se na relevância técnica e reprodutibilidade, adequados ao escopo desta revisão: (i) foco em turbinas eólicas de eixo horizontal em ambiente offshore, cobrindo um arco cronológico e de potência, a fim de evidenciar tendências de escalonamento; (ii) transparência e abertura de modelos, condição que viabilizam a comparação e validação entre estudos; (iii) relato quantitativo dos parâmetros-alvo — coeficiente de potência (C_p), razão de velocidade na ponta da pá, frequências naturais e resposta dinâmica —, requisito para síntese comparativa; (iv) aplicabilidade setorial, incluindo limitações estruturais e estratégias de controle, essenciais à transferência dos resultados para o contexto industrial.

Realizou-se uma busca com a combinação (AND; OR) de termos-chave e palavras-chave: “Horizontal-Axis Wind Turbine”, “offshore”, “HAWT”, “large-scale”

- CFD Letters (CFDL): revista internacional que aborda tópicos eminentes da teoria e aplicações da dinâmica dos fluidos computacional. A busca retornou um número de 39 artigos, no entanto, depois de uma análise do contexto, foi selecionado 1 artigo.
- Google Acadêmico: Ferramenta do Google com amplo conhecimento na área acadêmica. A busca retornou 3 artigos, no entanto, com análise dos títulos e resumos, foi selecionado 1.
- OSTI – U.S. Department of Energy (DOE) / NREL: Laboratório Nacional de Energia Renovável (National Renewable Energy Laboratory – NREL), com foco em pesquisa, desenvolvimento e inovação em energias renováveis, sendo reconhecido por criar modelos de turbinas eólicas de referência. A busca retornou um número de 4 relatórios técnicos, no entanto, mediante análise de contexto, foram selecionados 3.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Jonkman et al. (2009) conduziram um estudo técnico para desenvolver um modelo de referência de turbina eólica offshore, com o objetivo de padronizar as especificações de turbinas multimegawatt utilizadas em sistemas de energia eólica em alto-mar. A turbina de referência desenvolvida, conhecida como NREL 5-MW baseline wind turbine.

Os autores consideraram os parâmetros, como: potência nominal: 5 MW; diâmetro do rotor 126 m; altura do cubo: 90 m; velocidade do vento de corte inicial / nominal / final: 3,0 m/s / 11,4

m/s / 25 m/s; velocidade nominal do rotor: 12,1 rpm; massa do rotor: 110.000 kg; massa de cada pá: 17.740 kg; eficiência do gerador: 94,4% e etc.

Os autores utilizaram as ferramentas de simulação FAST com AeroDyn (simulador aero-hidro-servo-elástico do NREL) e ADAMS com A2AD (modelo mecânico com entrada de dados aerodinâmicos) para validar e otimizar o desempenho do modelo, assim permitindo simulações aero-servo-elásticas completas.

Na Figura 2 apresentam-se as respostas em regime permanente em função da velocidade do vento, onde "VelRot" representa a velocidade de rotação do gerador (eixo de alta velocidade); "PotMec" e "PotEle" representam, respectivamente, a potência mecânica no rotor e a potência elétrica de saída do gerador; "EmpRot" representa o empuxo (força axial) do rotor; "TorqMec" representa o torque mecânico no eixo de baixa velocidade.

Os resultados das respostas estáticas da turbina em relação a velocidade do vento, como: potência gerada, torque do gerador, ângulo de passo das pás e velocidade do rotor indicaram que os valores de massa, rigidez e geometria do rotor e da torre foram fundamentais para garantir um desempenho estável, especialmente frente a variações de velocidade do vento.

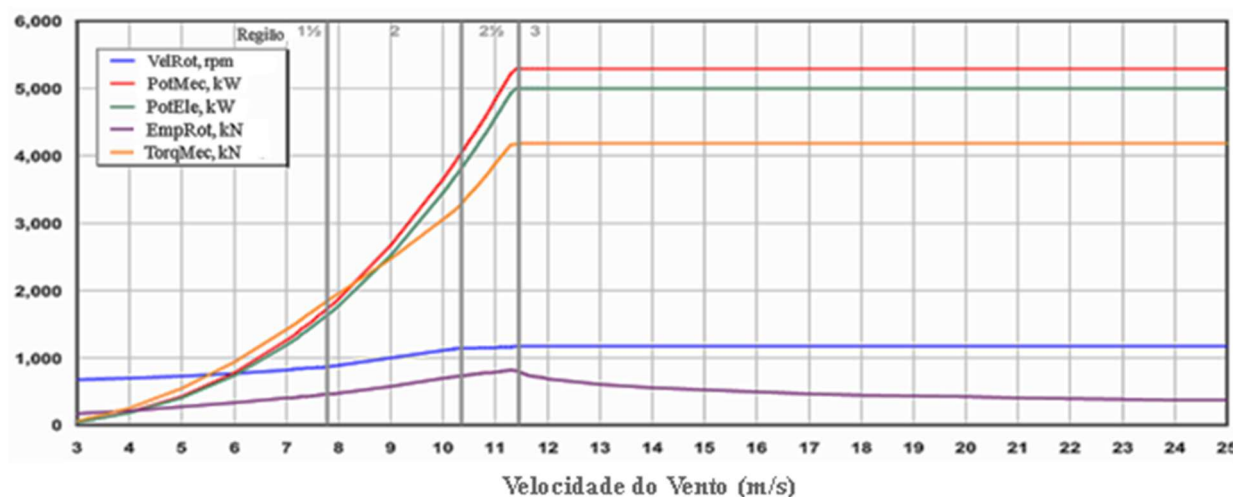


Figura 2. Parâmetros de saída (Jonkman et al., 2009)

Bak et al. (2013) apresentaram o desenvolvimento do *Light Rotor 10-MW Reference Wind Turbine (LR10-MW RWT)*, uma turbina eólica de referência concebida no âmbito do projeto *Light Rotor*, com foco na otimização estrutural e aerodinâmica de rotores de grande porte. O estudo teve

como base o escalonamento da turbina de referência de 5,0 MW, mantendo a potência específica e adotando um rotor de 89,17 m de raio.

O projeto seguiu um processo iterativo de tentativa e erro, onde foi desenvolvido seguindo a Figura 3. Os autores analisaram sob os aspectos do design aerodinâmico, estrutural e aeroelástico, utilizando ferramentas como o XFOIL para CFD e HAWTOPT para aerodinâmica, o Abaqus e BECAS para o estrutural, e HAWC2 e HAWCStab2 para aeroelasticidade e controle. O perfil aerodinâmico FFA-W3 foi selecionado por seu alto desempenho em condições de maior espessura relativa, o que permite maior rigidez estrutural com menor massa.

Os resultados da segunda iteração mostraram desempenho satisfatório em termos de eficiência aerodinâmica e controle de cargas, apesar da perda de eficiência quando comparado ao rotor de 5,0 MW.

Nos resultados, apresentados na Tabela 2, mostrara-se que a escolha da potência específica influencia diretamente no desenvolvimento do projeto e nas leis de escalonamento tradicionais. Por fim, serão necessárias novas iterações para buscar otimizar o controle, cargas e estruturas.

Os autores destacam que o conhecimento especializado é fundamental em etapas específicas do projeto e conhecimento geral nos projetos de pás são fundamentais nas decisões eficazes.

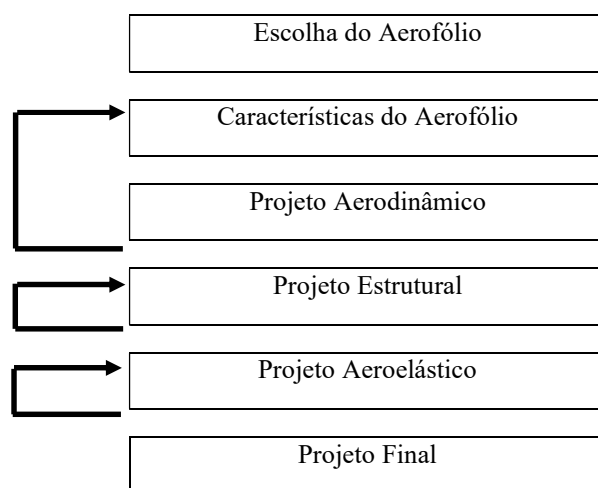


Figura 3. Esboço do procedimento de iteração do projeto (Bak et al., 2013)

Pichitkul e Sankar (2019) trabalharam no desenvolvimento de um projeto aerodinâmico e na modelagem de uma turbina eólica offshore de 2,0 MW, destinada a operar em um parque eólico hipotético de 120 MW. Utilizando teorias clássicas de elemento de pá com momento (BEM) e um

código computacional próprio, chamado *CFD GT-Hybrid*, que utiliza o modelo RANS acoplado com o modelo de esteira lagrangiana, os autores analisaram o desempenho da turbina em diferentes condições operacionais.

O projeto considerou a distribuição de torção não linear e variação da corda da pá para maximizar o coeficiente de potência (C_p). Na análise ficou demonstrado que, em velocidades nominais de vento (10 m/s), o escoamento permanece aderido em toda a extensão da pá, resultando em um C_p máximo de 0,47. Já em velocidades elevadas (25 m/s), observou-se a separação do escoamento na região média da pá, impactando negativamente a performance. Variações no ângulo de pitch mostraram que um ajuste de 2° melhora significativamente o desempenho, ampliando a área de baixa pressão e aumentando a sustentação.

A proposta aplicada no desenvolvimento do projeto com a combinação de BEM clássico com um código computacional de CFD híbrido permitiu realizar análises detalhadas com custo computacional reduzido. Sendo utilizado um projeto consistente com a realidade offshore e obtendo resultados do coeficiente de potência (C_p) próximos do limite teórico e competitivo com turbinas comerciais de 2 MW.

Gaertner et al. (2020) apresentaram a definição da *IEA 15-Megawatt Offshore Reference Wind Turbine*, desenvolvida no âmbito do *IEA Wind Task 37* em colaboração entre o NREL (EUA), a DTU (Dinamarca) e a Universidade do Maine. O estudo teve como objetivo criar uma turbina de referência aberta e padronizada para análises aeroelásticas, estruturais e de controle. A turbina proposta é uma máquina *direct-drive* de classe IB, com diâmetro de rotor de 240 m, altura do cubo de 150 m e três pás de 117 m, cada uma com massa aproximada de 65 toneladas. O projeto aerodinâmico utilizou a família de perfis DTU FFA-W3, resultando em um coeficiente de potência de 0,489 e uma produção anual de energia estimada em 77,4 GWh.

A torre e a fundação monopilar foram projetadas considerando restrições de frequência natural, de modo a evitar interações com frequências excitadas pelas pás e pelas ondas oceânicas. O monopilar possui 10 m de diâmetro e 45 m de profundidade de embutimento, representando o limite atual das capacidades industriais de fabricação. A nacelle adota um gerador síncrono de ímãs permanentes com rotor externo, favorecendo robustez estrutural, simplicidade e aumentando a dissipação térmica. A análise de cargas segundo os casos de projeto IEC identificou condições críticas em ventos extremos e desalinhamentos de guinada, mas os resultados mostraram deflexão máxima da ponta da pá de 22,8 m, mantendo margem segura em relação à torre.

Zahle et al. (2024) trabalharam no desenvolvimento da IEA 22-Megawatt Offshore Reference Wind Turbine (IEA 22 MW RWT), uma turbina eólica de referência aberta e padronizada, concebida no âmbito da IEA Wind Task 55 – iniciativa que dá continuidade aos esforços da Task 37 para o desenvolvimento de turbinas eólicas de referência.

A turbina proposta possui potência nominal de 22 MW, diâmetro do rotor de 284 metros, altura do cubo de 170 metros e três pás de 137,8 metros de comprimento, cada uma com massa de 82,3 toneladas. O sistema de controle opera com velocidade variável e passo coletivo, abrangendo uma faixa de velocidades de vento de 3 a 25 m/s.

A aerodinâmica das pás utiliza a série de perfis FFA-W3, otimizados via simulações CFD 2D (EllipSys2D) em números de Reynolds elevados (8 a 18 milhões). O projeto visou maximizar a produção anual de energia (AEP), com coeficiente de potência próximo de 0,5, e um potencial de geração anual acima de 100 GWh, dependendo das condições de vento. A pré-curvatura das pás foi limitada a 7 metros, e o controle por *peak shaving* foi implementado para reduzir cargas em regime nominal sem perdas significativas de produção.

A análise de cargas utilizou os códigos aeroelásticos HAWC2 e OpenFAST, considerando casos críticos de operação e extremos segundo a norma IEC. Nos resultados apresentaram deflexões de ponta de pá abaixo de 20 metros e margens de segurança adequadas para integridade estrutural. A frequência do primeiro modo flapwise das pás é de 0,384 Hz, e os modos estruturais foram desacoplados dos modos excitáveis por vento e ondas.

Tabela 1. Parâmetros de simulações e experimentos de turbinas eólicas de eixo horizontal offshore

Turbina Eólica	Categoria	Pichitkul & Sankar (2019)	Jonkman et al. (2009)	Bal et al. (2013)	Gaerthier et al. (2020)	Zahle et al. (2024)
Coeficiente de potência (C_p)		$\approx 0,47$ (máx.; BEM/CFD)	0,443 (nominal)	0,49 máx.	0,489 (máx. de projeto)	$\approx 0,500$ máx.
Coeficiente de empuxo (C_t)		—	—	—	0,799 (de projeto)	$\approx 0,800$ máx.
Velocidade máx. da ponta da pá		109,2 m/s	80 m/s.	90 m/s	95 m/s	105 m/s
(tip speed na rotação de projeto)						
Tip-speed ratio (TSR) nominal		10,92 m/s	$\approx 7,0$ a 11,4 m/s	10,58 m/s (projeto)	9 m/s	9,15 m/s
Perfis aerodinâmicos	Aerodinâmica	NREL S818 (raiz),	Cylinder1, Cylinder2; DU40_A17,	Série DTU FFA-W3	SNL-FFA-W3 (flatback espesso);	FFA-W3-360 à FFA-W3-270 (blend);
		S825 (meia-pá),	DU35_A17, DU30_A17, DU25_A17,		FFA-W3-241 e FFA-W3-211;	
		S826 (ponta)	DU21_A17; NACA64_A17.			
						Perfil cilíndrico-raiz ($C_l=0$, $C_d=0,35$)
Velocidades		Faixa analisada: 6–25 m/s;	Cut-in: 3 m/s;	Cut-in: 4 m/s;	Cut-in: 3 m/s;	Cut-in: 3 m/s;
		Rated: 10 m/s (2 MW)	Nominal (rated): 11,4 m/s;	Nominal (rated): 10,75 m/s;	Nominal: 10,59 m/s;	Nominal: 11 m/s;
			Cut-out: 25 m/s.	Cut-out: 25 m/s	Cut-out: 25 m/s	Cut-out: 25 m/s
Massa de cada pá (t)		6,9	17,74	47,7	65,25	82,301
Massa rotor (t)		41,2	110	225	1.017 (rotor e nacelle)	1.215,6 (rotor e nacelle)
Massa nacelle (t)		75,2	240	543	—	41 m
Distância pá-torre	Estrutural	—	—	—	30,0 m	—
Frequências naturais		—	Pá – flapwise: 0,70 Hz;	—	0,555 Hz (flapwise);	0,384 Hz (flapwise);
		—	Pá – edgewise: 1,08–1,09 Hz	—	0,642 Hz (edgewise)	0,520 Hz (edgewise)
		—	(modos assimétricos).	—	—	—
Deflexão máx. da ponta da pá		—	—	—	22,8 m	44,7 m
Ferramentas Principais		Código BEM próprio, GT-Hybrid;	FAST, AeroDyn, ADAMS com A2AD	XFOIL, HAWTOPT, BECAS,	OpenFAST (frameworks),	EllipSys2D, HAWC2, OpenFAST
		RANS + esteira Lagrangiana)	(Aeroelasticidade, Simulação Mecânica)	Abaqus, HAWC2, HAWCStab2	HAWC2 (integrações);	(Aerodinâmica (CFD),
		(Aerodinâmica - CFD)	Estrutural, Aeroelasticidade)	monopile		Aeroelasticidade)

4 CONCLUSÕES

A análise integrada dos estudos de caso permite identificar tendências no projeto de turbinas eólicas offshore de grande escala. A evolução da potência nominal de 5,0 MW para 22 MW resultou em um aumento do diâmetro do rotor de 126 m para 284 m. Entretanto, a principal desvantagem identificada é o aumento não linear da massa das pás. Enquanto a potência quadruplicou (de 5,0 MW para 22 MW), a massa individual de cada pá aumentou cerca de 4,6 vezes (de 17,7 t para 82,3 t). Este crescimento impõe desafios para a logística, fabricação e integridade estrutural, exigindo o uso de materiais compósitos e técnicas de projeto otimizadas, como a adoção de perfis aerodinâmicos de alto desempenho.

Do ponto de vista da modelagem numérica, a revisão evidencia uma evolução contínua no acoplamento de ferramentas especializadas para capturar a complexa interação aero-hidro-servo-elástica inerente às HAWT offshore de grande porte. Verificou-se uma transição de modelos relativamente simplificados, que utilizaram códigos baseados em Teoria do Elemento de Pá (BEM) com fatores de correção, para a adoção de frameworks integrados de alta fidelidade, como o OpenFAST, e solvers híbridos como o GT-Hybrid, que combina modelos RANS com modelagem Lagrangiana da esteira. No entanto, o balanço entre custo computacional e acurácia nos resultados permanece como desafio central. A sinergia entre diferentes ferramentas – utilizando BEM/CFD híbrido para aerodinâmica, elementos finitos com Abaqus, BECAS para estrutura e modelos multicorpo (HAWC2) para a resposta dinâmica global – mostrou-se necessária para projetar e validar com confiança turbinas na faixa de 15 a 22 MW.

Desta revisão — centrados no coeficiente de potência (C_p), na razão de velocidade na ponta da pá (tip-speed ratio – TSR), nas frequências naturais, na resposta dinâmica e na comparação de metodologias — recomenda-se: (i) avançar no acoplamento aero-hidro-servo-elástico por meio de frameworks abertos, como o OpenFAST e o HAWC2, e de abordagens combinadas de teoria do elemento de pá com momento e dinâmica dos fluidos computacional, buscando melhor relação entre custo e capacidade preditiva; (ii) investir em materiais compósitos e em perfis de elevada espessura do tipo flatback, com pré-curvatura controlada, (iii) explorar e validar alternativas de fundação e estratégias de desacoplamento modal na integração torre-fundação para escalas superiores a 15 MW; e (iv) adotar estratégias de controle avançado orientadas a maximizar a produção anual de energia sem penalizar a integridade estrutural

Portanto, embora as ferramentas de simulação computacional tenham permitido otimizar o desempenho e a integridade estrutural, a superação desses gargalos é essencial para viabilizar a próxima geração de turbinas, como as de 35 MW previstas para 2030.

REFERÊNCIAS

- Bak, C., Zahle, F., Bitsche, R., Kim, T., Yde, A., Henriksen, L. C., Hansen, M. H., Blasques, J. P. A. A., Gaunaa, M., and Natarajan, A., 2013. The dtu 10-mw reference wind turbine. In Danish wind power research 2013.
- Burton, T. et al., Wind energy handbook. 3rd ed. John Wiley & Sons. Hoboken, New Jersey, USA, 2021.
- Gaertner, E. et al. 2020. Definition of the IEA 15-Megawatt Offshore Reference Wind. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP-5000-75698. Disponível e: <<https://www.nrel.gov/docs/fy20osti/75698.pdf>> Acessado em: 24 set. 2025.
- GWEC – Global Wind Energy Council. Global Wind Report 2025. Bruxelas: GWEC, 2025. Disponível em: <<https://www.gwec.net/reports/globaloffshorewindreport>>. Acessado em: 10 set. 2025.
- Jonkman, J., Butterfield, S., Musial, W., and Scott, G., 2009. Definition of a 5-mw reference wind turbine for offshore system development. Tech. rep., National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States). Disponível em: <<https://www.nrel.gov/docs/fy09osti/38060.pdf>>. Acessado em: 15 set. 2025
- National Renewable Energy Laboratory, 2025. OpenFAST documentation. Disponível em: <https://www.nrel.gov/wind/nwtc/openfast>>. Acessado em: 20 ago. 2025.
- PICHITKUL, A.; SANKAR, L. N. Aerodynamic Design and Modeling of Large-Scale Offshore Wind Turbines. CFD Letters, v. 11, n. 10, p. 1-14, 2019.
- Zahle, F., Barlas, A., Lønbæk, K., Bortolotti, P., Zalkind, D., Wang, L., Labuschagne, C., Sethuraman, L., & Barter, G. (2024). Definition of the IEA Wind 22-Megawatt Offshore Reference Wind Turbine. Technical University of Denmark. <https://doi.org/10.11581/DTU.00000317>

