

1º CONGRESSO

do Programa de Pós-Graduação em

Engenharia Mecânica

14 a 17 de dezembro de 2021

Cegraf UFG



UFG Universidade Federal de Goiás

Reitora

Angelita Pereira de Lima

Vice-Reitor

Jesiel Freitas Carvalho

Diretora do Cegraf UFG

Maria Lucia Kons

Comitê Organizador

Daniel Souza

Demostenes Ferreira Filho

Felipe Pamplona Mariano

Gustavo de Castro Lopes

Renata Rodrigues Alves

Revisores Técnicos

André Contin

Andreia Aoyagui Nascimento

Aristeu da Silveira Neto

Daniel Fernandes da Cunha

Daniel Souza

Demostenes Ferreira Filho

Felipe Pamplona Mariano

João Paulo da Silva Fonseca

José Lúcio Gonçalves Júnior

Leonardo de Queiroz Moreira

Marlize Garcia Fagundes Neto

Rodrigo Pinto Lemos

Salviano de Araújo Leão

Valtair Antonio Ferraresi

Zenón José Guzmán Del Prado

1º CONGRESSO

do Programa de Pós-Graduação em

Engenharia Mecânica

Cegraf UFG

2022

© Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2022

© Cegraf UFG, 2022

Diagramação e Capa:

Julyana Aleixo Fragoso

Normalização técnica:

José Pedro Morais de Araújo

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
GPT/BC/UFG

C749 Congresso do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
(1. : 2021 : Goiânia, GO).

Anais do I ° Congresso do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica [Ebook] / comitê organizador, Daniel Souza ... [et al.]. – Dados eletrônicos (1 arquivo : PDF). - Goiânia : Cegraf UFG, 2022.

ISBN: 978-85-495-0560-6

Evento realizado nos dias : 14 a 17 de dezembro de 2021 em Goiânia, Goiás.

1. Engenharia mecânica - Congressos. 2. Engenharia mecânica - Pesquisa 3. Engenharia mecânica - Estudo e ensino (Pós-graduação). 4. Universidade Federal de Goiás. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. I. Souza, Daniel. II. Título.

CDU : 621

APRESENTAÇÃO DO CONGRESSO

O 1º Congresso do PPGMEC foi criado com o objetivo de discutir as pesquisas em desenvolvimento e tendências futuras no âmbito do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Universidade Federal de Goiás.

Desta forma, através do estreitamento e cooperação entre alunos de graduação, pós-graduação, técnicos e docentes permanentes do PPGMEC, o congresso visa aumentar a integração entre os discentes do programa e da graduação, além de discutir e incentivar o fortalecimento do Programa de Pós-Graduação por meio do Simpósio de Autoavaliação.

Goiânia, dezembro de 2021.

Comissão Organizadora

Sumário

ANÁLISE E COMPARATIVO DE DESGASTE MECÂNICO ENTRE AÇO INOX AISI 420 E AÇO CARBONO SAE 1045	9
TRATAMENTO DE SUPERFÍCIE EM SUBSTRATOS DE AÇO DA INDÚSTRIA FARMACÊUTICA VIA LASER DE CO ₂	14
ANÁLISE DA RESISTÊNCIA AO DESGASTE ABRASIVO DE REVESTIMENTO DURO APLICADO POR SOLDAGEM NA INDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA ...	18
PROCESSO DE MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO (MADA) EM AÇO CARBONO	22
EFEITO DO TRATAMENTO TÉRMICO EM SUPERFÍCIES REVESTIDAS COM INCONEL 625	27
INFLUÊNCIA DO AJUSTE DA TAXA DE SUBIDA DA CORRENTE NA REGULARIDADE DO PROCESSO EM SOLDAGEM MIG/MAG POR CURTO-CIRCUITO	35
ANÁLISE DE APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE VELOCIMENTRIA DE IMAGEM DE PARTÍCULA – PIV PARA DESENVOLVIMENTO DE APARATO EXPERIMENTAL DE BAIXO CUSTO	39
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SISTEMÁTICA DE ESFORÇOS ESTRUTURAIS E DANOS EM TURBINAS EÓLICAS	45
OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS DE VENTILAÇÃO E AR- CONDICIONADO USANDO DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL	50
SOLUÇÃO NUMÉRICA DA EQUAÇÃO DE BURGERS ENVOLVENDO MÉTODOS PSEUDOESPECTRAL DE FOURIER E FRONTEIRA IMERSA	55
AERODINÂMICA DE TURBINAS EÓLICAS DE EIXO VERTICAL: ESTADO DA ARTE	59
RESOLUÇÃO DA EQUAÇÃO DE BURGERS UTILIZANDO CÓDIGO EM FORTRAN	64

ESTUDO EXPERIMENTAL DO LEIAUTE DE DISPOSIÇÃO DOS MATERIAIS DE ABSORÇÃO SONORA EM UMA SALA	70
ANÁLISE NUMÉRICA E FÍSICA DA CONDUÇÃO BIDIMENSIONAL PERMANENTE DE ENERGIA TÉRMICA EM UMA PLACA PLANA	74
EFEITO DOS PARÂMETROS DE USINAGEM NA USINABILIDADE DOS AÇOS INOXIDÁVEIS 410D E 420A FERRÍTICO E MARTENSÍTICO NO PROCESSO DE ELETROEROSÃO	79
ANÁLISE DE TOLERÂNCIA DIMENSIONAL E RESISTÊNCIA MECÂNICA EM ROSCAS FABRICADAS PELO PROCESSO DE FDM EM PLA.....	84
TENDÊNCIAS DO TRATAMENTO TÉRMICO EM AÇO INOX MARTENSÍTICO 410 E 420 E SEU EFEITO NAS PROPRIEDADES DO MATERIAL	89
REVISÃO LITERÁRIA SOBRE PLANEJAMENTO AUTOMÁTICO APLICADO A PROCESSOS DE MANUFATURA	93
SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE ESCOAMENTO SOBRE TERRENOS PLANOS PARA A OBTENÇÃO DO POTENCIAL EÓLICO LOCAL.....	97
SIMULAÇÕES NUMÉRICAS E COMPUTACIONAIS DE ESCOAMENTOS EM AMBIENTES INTERNOS PARA FINS DE OTIMIZAÇÃO DO SISTEMA DE VENTILAÇÃO.....	101
ESCOAMENTO SOBRE UM CILINDRO FIXO COM BAIXO NÚMERO DE REYNOLDS.....	106
ANÁLISE NUMÉRICA DE ESCOAMENTOS EM CAVIDADE COM TAMPA DESLIZANTE UTILIZANDO O OPENFOAM	110
SOLUÇÃO COMPUTACIONAL DA DIFUSÃO TÉRMICA 2D PELO MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS	115
MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS NA ANÁLISE DA EQUAÇÃO DE BURGUERS UNIDIMENSIONAL E INCOMPRESSÍVEL	120
AVALIAÇÃO DOS NÍVEIS DE PRESSÃO SONORA EM UM TÚNEL DE VENTO DE CIRCUITO ABERTO E A SAÚDE OCUPACIONAL	125

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DOS MATERIAIS DE ABSORÇÃO SONORA NOS PARÂMETROS OBJETIVOS DE SALAS	131
MODELAGEM EXPERIMENTAL DO ARRANJO PARIETAL UTILIZANDO TECIDO NÃO BIOLÓGICO	136
ESTUDO DA ADEQUAÇÃO DE UMA MÁQUINA DE MANUFATURA PARA REDE DE COMUNICAÇÃO ETHERNET	141
ATIVIDADES EXPERIMENTAIS DA INFLUÊNCIA DO GÁS DE PROTEÇÃO NA SEGUNDA CAMADA DE REVESTIMENTO DE LIGA DE NÍQUEL (INCONEL 625) EM SUBSTRATO DE AÇO CARBONO DEPOSITADAS PELO PROCESSO GMAW	145
APLICAÇÃO DO PROCESSO MADA COM LIGAS DE COBALTO	150
IMPLEMENTAÇÃO DA TÉCNICA DE MANUFATURA ADITIVA PELO PROCESSO GMAW COM ARAME FRIO.....	155
AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS E TRAJETÓRIAS DE APLICAÇÃO DO PROCESSO MASA EM UMA PEÇA DE AÇO AO CARBONO.....	160
INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE INTERPASSE NO PERFIL DE UMA PAREDE EM AÇO AO CARBONO FABRICADA POR MANUFATURA ADITIVA PELO PROCESSO MADA	165

ANÁLISE E COMPARATIVO DE DESGASTE MECÂNICO ENTRE AÇO INOX AISI 420 E AÇO CARBONO SAE 1045

Aires Pedro Junior,¹ Daniel Fernandes da Cunha,² José Lúcio Gonçalves Júnior³

Introdução

De um modo geral, algumas propriedades do aço inox possuem superioridade mecânica e química em comparação com aço carbono, como, por exemplo, abrasão mecânica, acabamento e resistência à corrosão (Pramanik; Basak, 2015). Nesta investigação, os objetos de estudos operam em meio à massa de concretagem, ou seja, trabalham com um fluido extremamente abrasivo (Fabbro *et al.*, 2021). Portanto, é de grande importância uma investigação do comportamento tribológico referente à degradação dos componentes metálicos, principalmente em consequência do meio de operação ser úmido e/ou molhado, juntamente com partículas abrasivas (Gupta, 2018).

Na prática, o estudo aqui apresentado pretende analisar e comparar, através de comportamentos tribológicos, os materiais fabricados em aço carbono SAE 1045, visando sua substituição por aço inox AISI 420 no que tange os componentes do equipamento de construção civil, o não comprometimento do custo de produção direta e indiretamente, sem prejudicar

1 Universidade Federal de Goiás - airespedro@discente.ufg.br.

2 Universidade Federal de Goiás - danielcunha@ufg.br.

3 Universidade Federal de Goiás - jlucio@ufg.br.

as condições do trabalho e conseqüentemente aumentando a vida útil dos componentes de estudo, além de beneficiar a empresa com características que apenas o aço inox possui, como, por exemplo, a eliminação do custo de pintura.

Metodologia

A investigação utiliza o método de revisão de literatura com caráter qualitativo, sendo que foram empregadas diversas pesquisas de obras e autores com o Qualis variando em A1 e A2. Além disso, fundamenta-se buscando referências em pesquisas de sites e documentos disponíveis na Web. Vale salientar que o estudo utilizou artigos e obras de grande relevância, tais como *Steel Products Manual: Stainless Steel* (Cobb, 1999), *Lubrication (tribology): education and research* (1966), *Aços e Ligas Especiais* (2006), entre outros. O período dos artigos e obras pesquisadas foram de trabalhos publicados nos últimos 20 anos e foram utilizadas as palavras-chave: “Tribologia”, “Abrasão”, “Aço inox AISI 420”, “Aço carbono SAE 1045”. No total, foram cerca de 20 artigos retirados da base de dados Elsevier e Scopus.

Os substratos que serão testados possuirão geometria retangular, com as dimensões 25mm × 76mm e a espessura variando entre 3,2mm e 12,7mm, que passarão por algum processo de usinagem e/ou conformação que será necessário avaliar qual. Discos de borracha com a espessura e diâmetro indicados pela norma ASTM-G65 (2010) e partículas de abrasão sílica (SiO₂) peneirado em malha 50/70 também serão empregados. As propriedades químicas e mecânicas dos corpos de provas estão disponíveis na Tabela 1 e Tabela 2:

Tabela 1 - Composição química do AISI 420 e SAE 1045 (% em peso)

ELEMENTO QUÍMICO	C	MN	SI	CR	NI	MO	FE
Aço Carbono SAE 1045	0,460	0,810	0,280	0,097	0,087	0,018	Bal.
Aço Inox AISI 420	0,450	0,500	0,380	13,680	0,170	0,040	Bal.

Fonte: Dodds et al. (2013); Castro et al. (2016).

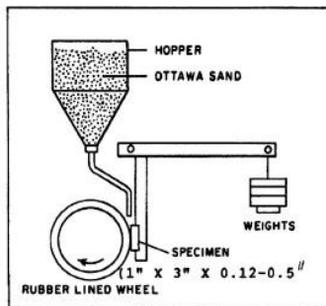
Os componentes disco de borracha e as partículas de abrasão servirão para acelerar o processo de abrasão conforme o diagrama da Figura 1.

Tabela 2 - Propriedades mecânicas do AISI 420 e SAE 1045

Tipo de aço	Tração (Mpa)	Estresse de rendimento (Mpa)	Alongamento [%]
Aço Carbono SAE 1045	770	510	17
Aço Inox AISI 420	1089	452	14.5

Fonte: Calik et al. (2009); Alam et al. (2020).

Figura 1 - Diagrama de funcionamento relativo ao equipamento de teste ASTM G65-04



Fonte: ASTM G65-04 (2010, p. 02).

A extração dos dados referente ao experimento a abrasão será em função do procedimento enquadrado pela norma ASTM-G65 (2010). Este procedimento avaliará o grau de resistência de cada amostra dos aços inox e carbono, levando em consideração o peso e as dimensões das amostras standard e resultante do teste com o abrasômetro. Este processo será repetido com outras amostras, isto é, serão quatro amostras para cada material e com diferentes cargas, sendo quatro amostras para o aço carbono SAE 1045 e quatro amostras para o aço inox AISI 420 por carga. O experimento será realizado com três cargas normais diferentes, 3Kg, 6Kg e 9Kg. As informações obtidas serão processadas e reportada em um *software* de modelagem estática respeitando os métodos estáticos apresentados em literaturas do autor Montgomery (2012). Inicialmente todos os materiais serão caracterizados por microscopia ótica para análises microestruturais.

Resultados e discussão

Mediante as investigações sobre as análises e os comparativos entre o SAE 1045 e AISI 420, ficou cognoscível que ambos os materiais são incongruentes mecanicamente, ou seja, possuem propriedades distintas (vide Tabela 2), no entanto, o AISI 420 pode ser aplicado em processos similares ao do aço carbono. Um estudo de Laguna-Camacho *et al.* (2013) demonstrou que o desempenho por desgaste de erosão por partículas sólidas no AISI 420 comparando com os AISI 316 e AISI 304 apresentou números superiores e satisfatórios, ou seja, são indícios que o AISI 420 tem propriedades interessantes que devem ser investigados. Ainda segundo os autores, o motivo desse desempenho se dá em função do comportamento dúctil no AISI 420, o mesmo comportamento que é apresentado no SAE 1045 (Neves *et al.*, 2020). Entretanto, não foi possível encontrar estudos ou artigos relacionados ao desgaste mecânico por abrasão entre si.

Conclusões

Através dos estudos aqui empregados, ficou claro que o aço inox AISI 420 leva uma boa vantagem sobre as características químicas e mecânicas de acordo com as literaturas, entretanto, o aço carbono SAE 1045 é um material comumente achado no território nacional. Outro dado importante obtido através da investigação, é em razão do aço inox AISI 420 ter propriedades martensíticas, ou seja, esse material pode passar por tratamento térmico com objetivo obter a tempera assim como o aço carbono 1045. Demais dados importantes serão obtidos ao longo das investigações, ajudando os leitores com a seleção dos materiais aqui mencionados.

Referências

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). *Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus: ASTM-G65-04*. 3. ed. West Conshohoken, 2010.

CALIK, A.; SAHIN, O.; UÇAR, N. Mechanical Properties of Boronized AISI 316, AISI 1040, AISI 1045 and AISI 4140 Steels. *Acta Physica Polonica*, v. 115, n. 3, p. 694-698, 2009. DOI: <https://doi.org/10.12693/APHYSPOLA.115.694>.

CASTRO, V. V.; FONTOURA, L. A. M.; BENFICA, J. D.; PACHECO, M. S. J. L.; SANTOS, C. A. Lubricated sliding wear of SAE 1045 and SAE 52100 steel against alumina in the presence of biodiesel, diesel and a 50:50 blend of those fuels. *Wear*, v. 368-369, p. 267-277, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.09.026>.

COBB, H. M. *Steel Products Manual: Stainless Steels*. Warrendale: The Iron and Steel Society, 1999. ISBN 1886362343.

DODDS, S.; JONES, A. H.; CATER, S. Tribological enhancement of AISI 420 martensitic stainless steel through friction-stir processing. *Wear*, v. 302, n. 1-2, p. 863-877, 2013. ISSN 0043-1648. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.01.007>.

FABBRO, S.; ARAUJO, L. M.; ENGEL, J.; KONDRATIUK, J.; KUFFA, M.; WEGENER, K. Abrasive and adhesive wear behavior of metallic bonds in a synthetic slurry test for wear prediction in reinforced concrete. *Wear*, v. 476, 2021, 203690. ISSN 0043-1648. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203690>.

GUPTA, R. K.; GUPTA, R. K. *Cutting tool for marble & granite: a review*. IOP Conference Series: material Science and Engineering, v. 377, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/377/1/012126>.

JOST, H. P. *Lubrication (tribology): education and research: A report on the Present Position and Industry's Needs*. London: HMSO, 1966.

LAGUNA-CAMACHO, J. R.; MARQUINA-CHÁVEZ, A.; MÉNDEZ-MÉNDEZ, J. V.; VITE-TORRES, M.; GALLARDO-HERNÁNDEZ, E. A. Solid particle erosion of AISI 304, 316 and 420 stainless steels. *Wear*, v. 301, n. 1-2, p. 398-405, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2012.12.047>.

MONTGOMERY, D. C. *Design and Analysis of Experiments*. 8. ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., 2012.

PRAMANIK, A.; BASAK, A. K. *Stainless Steel-microstructure: Mechanical Properties and Methods of Application*. New York: Nova Science Publishers, 2015. ISBN: 97811634820813. E-book.

SILVA, A. L. *Aços e Ligas Especiais*. 2. ed. São Paulo: Editora Blucher, 2006. ISBN 8521203829.

TRATAMENTO DE SUPERFÍCIE EM SUBSTRATOS DE AÇO DA INDÚSTRIA FARMACÊUTICA VIA LASER DE CO₂

André Carvalho Martins,¹ André Contin,² Daniel Fernandes da Cunha³

Introdução

Os aços inoxidáveis são empregados na indústria farmacêutica devido à sua alta resistência à corrosão e boas propriedades mecânicas. Essas características são essenciais já que os medicamentos produzidos devem obedecer a padrões de pureza e qualidade (Zaforra *et al.*, 2021). Os aços inoxidáveis 316L, aço liga 422 são também empregados como material estrutural nas indústrias de petróleo e gás, refinarias, produtos químicos, petroquímicos. No entanto, há uma baixa resistência ao desgaste do aço em aplicações prolongadas (Majumdar *et al.*, 2009). O desgaste é um dos maiores problemas encontrados na indústria farmacêutica, já que os aços inoxidáveis são as bases de selos mecânicos, retentores, entre outras peças que possuem contato/atrito constante de alta rotação.

O emprego de tratamento térmicos e termoquímicos objetiva o incremento da vida útil do material e conseqüentemente a redução da sua reposição. Neste trabalho, será empregue o uso do laser para esses tratamen-

1 Universidade Federal de Goiás - andre.eng.mec@outlook.com.

2 Universidade Federal de Goiás - andre.contin@ufg.br.

3 Universidade Federal de Goiás - danielcunha@ufg.br.

tos. O laser possui características favoráveis em processos de tratamento de superfície, devido à elevada densidade de potência irradiada em poucos segundos e pela rápida transferência de calor para o material, quando comparado com processos tradicionais de tratamentos térmicos e termoquímicos, que envolvem o emprego de fornos tipo mufla, por exemplo.

A proposta inclui o emprego do processo de laser de CO₂ para o tratamento térmico de têmpera superficial. Este processo baseia-se no rápido aquecimento superficial, promovido pela radiação do feixe de laser e, em seguida, pelo seu rápido resfriamento da superfície (D'Oliveira *et al.*, 2002). Durante esse processo, normalmente o substrato é recoberto por material foto-absorvedor a fim de aumentar a absorção para lasers de baixa potência de CO₂. Um dos materiais empregados é o negro de fumo. Esse pó também será avaliado a fim de produzir o tratamento termoquímico de carbonetação no substrato.

Metodologia

Os substratos de aço inoxidável e o pó de negro de fumo serão adquiridos comercialmente.

A pré-deposição do pó por aspersão com o uso de uma pistola pneumática será realizada manualmente sobre o substrato. Na sequência, a camada pré-depositada será irradiada com um feixe de laser de CO₂, do Laboratório de Materiais e Processos de Fabricação (LAMAF) com diferentes valores de densidade de energia. Serão realizados ensaios a fim de encontrar a densidade de energia correta para o substrato, como também a velocidade de irradiação do laser e número de ciclos de aquecimento. A cada valor de energia será gerado um corpo de prova ou amostra em que será realizada sua caracterização microestrutural e mecânica.

Outra rota a ser avaliada será o emprego de descargas elétricas, geradas no processo EDM (Electrical Discharge Machining) a fim de promover a carbonetação na superfície do aço inox, em meio a um fluido constituído de água destilada e negro de fumo ou grafite.

Para o processo de carbonetação por EDM será empregue a máquina de eletroerosão Modelo: ONC 400 Orbital do Laboratório de Materiais e Processos de Fabricação (LAMAF) com diferentes valores de corrente.

As análises dos resultados serão feitas por Microscopia óptica e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Serão empregues para verificar a morfologia das amostras. A Difratometria de raios-X será utilizada nas identificações do substrato, antes e depois do tratamento térmico Dureza Vickers, Rockwell C. Será utilizada na identificação da dureza do substrato antes e após o tratamento térmico, como também na seção transversal.

Resultados e discussão

Os resultados consistem da revisão da bibliografia acerca do emprego do laser para tratamentos em aços.

No trabalho de Vasconcelos (2012), foi empregado o pó de negro de fumo como material foto absorvedor/revestimento em um aço 4340. Com a aplicação do pó sobre a superfície do substrato e subsequente irradiação via laser, houve um incremento na dureza superficial da amostra, de 286 HV_{0,05} para 760 HV_{0,05}. Os resultados também mostraram uma diminuição do coeficiente de fricção da amostra revestida (coeficiente de atrito de 0,20) quando comparada com a amostra sem o revestimento (coeficiente de atrito de 0,70). De fato, o emprego de nanopartículas de negro de fumo auxilia na absorção da radiação incidente do um laser de CO₂ de baixa potência, promovendo o processo de endurecimento superficial, além de ser incorporado na superfície do aço, atuando como um lubrificante (Vasconcelos *et al.*, 2012).

Conclusões

Este trabalho visa mostrar uma alternativa de tratamento para melhorar as características do aço inoxidável, usando as nanopartículas do negro de fumo e um laser de CO₂.

Referências

D'OLIVEIRA, A. S. C. *et al.* Microstructural features of consecutive layers of Steellite 6 deposited by laser cladding. *Surface and Coatings Technology*, v. 153, n. 2-3, p. 203-209, 2022. DOI:10.1016/S0257-8972(01)01687-5.

MAJUMDAR, J. D. *et al.* Direct Laser of SiC dispersed AISI 316 l stainless steel. *Tribology International*, v. 42, n. 5, p. 750-753, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2008.10.016>

VASCONCELOS, G. *et al.* Covering with Carbon Black and Thermal Treatment by CO₂ Laser Surfaces of AISI 4340 Steel. In: DUMITRAS, D. C. (ed.). *CO2 Laser: Optimisation and Application*. London: IntechOpen, 2012, p. 275-282. DOI:10.5772/37640.

ZAFFORA, A. *et al.* Corrosion of stainless steel in food and pharmaceutical industry. *Current Opinion in Electrochemistry*, v. 29, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coelec.2021.100760>.

ANÁLISE DA RESISTÊNCIA AO DESGASTE ABRASIVO DE REVESTIMENTO DURO APLICADO POR SOLDAGEM NA INDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA

Vitória Ferreira de Oliveira Marques,¹ Valtair Antônio Ferraresi,² Daniel Souza³

Introdução

O Brasil é o maior produtor e exportador mundial de açúcar, respondendo por aproximadamente 20,3% da produção e 48,0% do comércio mundial do produto (Vidal, 2019). Desde o cultivo da cana-de-açúcar até a fabricação dos produtos finais a mesma passa por diversas etapas presentes nas fases agrícolas e industrial. A fase industrial consiste na recepção, preparo da cana e extração do caldo.

A busca pela maior produtividade nas usinas influencia o custo de produção e, em função do maior desgaste dos equipamentos esse custo pode ser elevado. Durante o processo produtivo, os rolos de moendas, as facas picadoras e os martelos desfibradores sofrem elevado desgaste que acabam por provocar a parada das máquinas. Devido ao fato de esses componentes serem fabricados em aço de baixo carbono, é fundamental a utilização de revestimento duro aplicado por soldagem (Santos *et al.*, 2005).

1 Universidade Federal de Goiás – vitoriaengmec@gmail.com.

2 Universidade Federal de Goiás – valtair@ufu.br.

3 Universidade Federal de Goiás – daniel.souza@ufg.br.

O objetivo desse trabalho é a apresentação de uma revisão bibliográfica sobre a aplicação de revestimento duro por soldagem em chapas de aço carbono através do processo de soldagem por Arame Tubular.

Metodologia

A maioria dos artigos estudados apresentam com metal de base um aço carbono comum sobre o qual é aplicado um revestimento duro por soldagem (uma ou duas camadas) de material de alta resistência ao desgaste abrasivo, tal como a liga de Fe-Cr-C, outras com adição de outros elementos, como Fe-Cr-C-Nb ou Fe-Cr-C-Ti.

A maioria das metodologias utilizadas, baseada em artigos, consiste na aplicação de revestimento duro por soldagem em chapas aço-carbono pelo processo de Arame Tubular. Após a soldagem são realizadas análise de dureza e microestrutura da zona fundida (ZF) e ensaios de desgaste da ZF do revestimento em Roda de Borracha (norma ASTM G50-00).

Resultados e discussão

Lima (2008) analisou a microdureza e a microestrutura das principais fases para os revestimentos: FeCrC; FeCrC+Nb e FeCrC+Ti e os resultados estão apresentados na Tabela 1. Verifica-se que enquanto o revestimento FeCrC apresenta em quase todo o volume do cordão uma microestrutura com crescimento dendrítico e apenas uma fina camada hipereutética na superfície, o revestimento com adição de Nb, opostamente, apresenta uma fina microestrutura dendrítica mais carbonetos NbC na interface com o metal de base, menos evidente que o FeCrC, e carbonetos primários (M₇C₃ e NbC). Na comparação com a liga FeCrC+Ti, observa-se que a mesma não formou estrutura eutética com o regime de soldagem utilizado, provavelmente devido aos teores de elemento de liga presentes na sua composição (Fe, Cr, C, Ti e Mo).

García (2011) realizou a análise comparativa de resistência ao desgaste abrasivo dos revestimentos com e sem a adição de arames não energizados no processo Arame Tubular. Os resultados obtidos estão na Figura 1.

Pode-se perceber que os revestimentos realizados com a adição de arame não energizado apresentaram (valores médios) melhor resistência ao desgaste abrasivo.

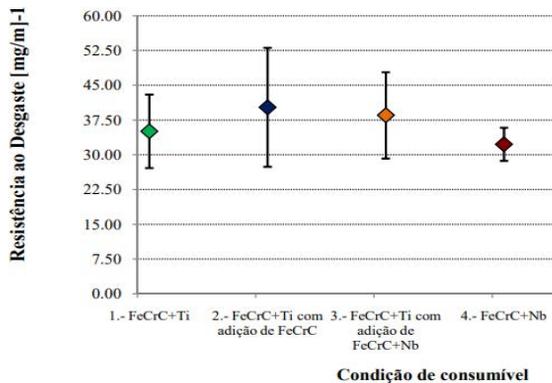
Souza (2015) realizou análises sobre a resistência ao desgaste abrasivo utilizando o processo de soldagem arame tubular (FCAW) duplo arame com ambos os arames energizados, a combinação de arame FeCrC+Ti-FeCrC+Ti e FeCrC+Nb-FeCrC+Nb obteve maior resistência ao desgaste quando comparados com as combinações: FeCrC-FeCrC; FeCrC-FeCrC+Ti e FeCrC-FeCrC+Nb.

Tabela 1 - Microestrutura, fase e microdureza dos revestimentos

Cons	Microestrutura	Fase	Microdureza (HV _{0,01})		
			Faixa	Média	DP
FeCrC	Dendritas de austenita com eutética interdendrítica (austenita + carbonetos) / eutética	Eutético	507-876	668	135
		Dendritas	356-420	393	22
		M ₇ C ₃	1051-1756	1510	240
FeCrC+Nb	Carbonetos de Cr primários M ₇ C ₃ e NbC em Matriz eutética.	Eutético	548-782	650	76
		M ₇ C ₃	1168-1452	1362	101
		NbC	1027-1514	1207	170
FeCrC+Ti	Carbonetos TiC em Matriz austenítica-martensítica.	Austenita	524-563	539	16
		Martensita	598-633	634	23
		TiC	2050-2970	2567	266

Fonte: Lima (2008).

Figura 1 - Análise comparativa de resistência ao desgaste dos revestimentos.



Fonte: García (2011).

Conclusões

Foi possível observar pelos diferentes estudos que o arame FeCrC+Nb obteve microestrutura composta por carbonetos do tipo M₇C₃ e carbonetos de Nióbio (NbC) em matriz hipereutética com a presença de dendritas de austenita. O arame FeCrC+Ti apresentou carbonetos de Titânio (TiC) em matriz austenítica-martensítica e ausência de carbonetos M₇C₃. A adição de arame não energizado apresentou melhoras em relação a resistência ao desgaste das ligas FeCrC+Nb e FeCrC+Ti. Para a adição de dois arames energizados, a combinação FeCrC+Ti-FeCrC+Ti e FeCrC+Nb-FeCrC+Nb apresentaram melhor resistência ao desgaste.

Agradecimento

Os autores agradecem a FAPEG pelo apoio financeiro.

Referências

- GARCÍA, D. B. C. *Aplicação de revestimento duro utilizando o processo arame tubular com e sem adição de arame não energizado para diferentes tipos de consumíveis*. 2011. 120f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia 2011.
- LIMA, A. C. *Estudo da aplicação de revestimento duro por soldagem com arames tubulares quanto à resistência ao desgaste de facas picadoras de cana-de-açúcar*. 2008. 232 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia Uberlândia, 2008.
- SANTOS, A. S.; FRANCO. A. A.; ALMEIDA, D. M.; PERTICARRARI, M. Soldagem na Indústria Sucroalcooleira. *Revista da Soldagem*, ano 1, n. 7, p. 20-26, 2005.
- SOUZA, D. D. B. G. *Aplicação de revestimento duro utilizando o processo FCAW duplo arame para diferentes tipos de consumíveis*. 2015. 116f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia Uberlândia, 2015. DOI: <https://doi.org/10.14393/ufu.di.2015.341>.
- VIDAL, M. F. Desempenho recente do setor sucroalcooleiro nordestino. *Caderno Setorial ETENE*, Fortaleza, ano 4, n. 67, fev. 2019. (Série Caderno Setorial ETENE, n. 67).

PROCESSO DE MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO (MADA) EM AÇO CARBONO

Gustavo de Castro Lopes,¹ Demostenes Ferreira Filho²

Introdução

A manufatura aditiva de metal é um processo de fabricação de peças, por meio da adição de algum metal, fabricado a partir de um modelo 3D previamente projetado. Possui alta precisão e tempo de fabricação curto, com liberdade para geometrias simples ou até mais complexas (Liu *et al.*, 2020a). Pode-se destacar alguns métodos para realizar o processo de manufatura aditiva de metal, como por exemplo a fusão em leito de pó; a deposição por energia direta; por deposição a arco (LIU *et al.*, 2020a). Com relação aos métodos que utilizam alimentação por arame, os processos mais comuns utilizados são TIG, MIG/MAG e Plasma. Desta forma, pode-se denominar esses processos como Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA). Portanto, este trabalho tem como objetivo realizar uma revisão bibliográfica sobre o processo MADA, destacando os principais parâmetros desse procedimento, utilizando o método MIG/MAG em aço carbono com o auxílio de um manipulador robótico.

1 Universidade Federal de Goiás – castro.gustavo@discente.ufg.br.

2 Universidade Federal de Goiás – demostenesferreira@ufg.br.

Metodologia

Para a realização da revisão bibliográfica, utilizou-se principalmente a busca de artigos no portal periódicos da CAPES, além de sites de revistas na área de materiais e manufatura aditiva. Assim, foram selecionados por volta de 40 artigos relacionados ao tema Manufatura Aditiva por Deposição a Arco, e a partir desses trabalhos foi possível buscar as referências mais adequadas que pudessem contribuir com este trabalho, levando em consideração o *qualis* e a data de publicação, optando preferencialmente por artigos de *qualis* mais elevado e com data mais recente.

Resultados e discussão

A partir da leitura desses artigos, foi possível chegar a resultados como por exemplo os presentes na Tabela 1. Comparado com a manufatura feita através de processos com aditivos em pó e fusão a laser, o MADA possui aplicabilidade mais ampla, pois abrange uma maior variedade de materiais metálicos e custo mais baixo, mesmo sendo capaz de fabricar peças grandes e complexas. Além disso, possui maior taxa de deposição e um custo de *hardware* do sistema mais barato do que os de sistemas envolvendo fusão a laser e pó, fazendo com que o processo MADA possua uma aplicação comercial muito ampla (Liu *et al.*, 2020a).

Tabela 1 - Comparação entre a Manufatura Aditiva com base em pó e fusão a laser com o método MADA

	Manufatura Aditiva envolvendo laser e pó	MADA
Taxa de deposição	0,1-0,2 kg/h	4 kg/h
Taxa de utilização	10-60%	90%
Materiais adequados	Ligas de titânio, ligas de aço	Ligas de alumínio, ligas de magnésio, ligas de aço
Custo de fabricação	Alto	Baixo
Aplicação em peças de trabalho	Peças complexas, peças pequenas	Peças em geral
Precisão na fabricação	0,05 mm	0,2 mm

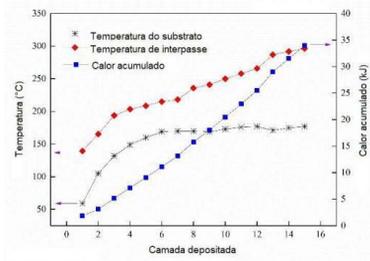
Fonte: Elaboração própria.

Entretanto, o método MADA também apresenta algumas desvantagens como maior instabilidade no processo, precisão inferior da peça formada e qualidade superficial menor quando comparado a outros métodos. Além disso, é comum a presença de defeitos de soldagem como rachaduras, poros e distorções de solda (Liu *et al.*, 2020b).

Por possuir uma alta taxa de deposição e uma grande quantidade de energia envolvida no processo, o acúmulo de calor, devido a uma dissipação insuficiente, é um fator crítico que afeta a estabilidade do processo MADA com relação à precisão geométrica, defeitos de deposição, propriedades do material e microestrutura (Wu *et al.*, 2017). Conforme Yang *et al.* (2016), em peças de trabalho com paredes finas, à medida que a altura da parede se eleva o acúmulo de calor se torna um fator ainda mais influente.

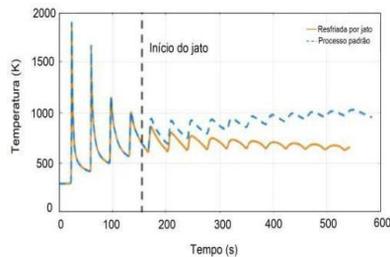
Conforme observado em Wu *et al.* (2017), devido à dissipação térmica ao longo da parede, existe uma diferença significativa na variação de temperatura entre o substrato e a camada depositada. Além disso, durante a fabricação, a diferença na temperatura de interpasse entre as camadas subsequentes determina o acúmulo de calor final ao longo da deposição, conforme observa-se na Figura 1. Notou-se que o acúmulo de calor aumentou conforme aumentou-se também o número de camadas.

Figura 1 - Acúmulo de calor ao longo da deposição da liga Ti₆Al₄V feita por MADA.



Fonte: Wu *et al.* (2017).

Figura 2 - Acúmulo de calor ao longo da deposição da liga Ti₆Al₄V feita por MADA.



Fonte: Wu *et al.* (2017)

De acordo com Montevecchi *et al.* (2018), ao comparar a temperatura de dois processos, sendo um resfriado a jato de ar e outro sem resfriamento, os resultados do monitoramento da temperatura confirmam a eficácia do resfriamento por impacto do jato no que diz respeito a temperatura de

interpasse. Observando a simulação de resfriamento padrão, a temperatura mínima por ciclo aumenta progressivamente durante a simulação, indicando uma temperatura variável entre cada passe, conforme Figura 2. Por outro lado, na simulação de resfriamento a jato a temperatura é praticamente constante desde a ativação do jato, destacando a eficácia do impacto do jato em prevenir um aumento da temperatura entre passes.

Conclusões

Foi possível observar que o processo MADA possui alta aplicabilidade e baixo custo, abrangendo uma ampla variedade de materiais metálicos. Notou-se também que o processo possui custo baixo, maior taxa de deposição, ampla aplicação em diferentes tipos de peça de trabalho e diversidade na escolha do tipo de deposição (MIG/MAG, TIG, Plasma), além da possibilidade de automatização através de um manipulador robótico. Além disso, o acúmulo de calor é comum no processo MADA, podendo ser amenizado por algum processo de resfriamento.

Agradecimento

Os autores agradecem a FAPEG pelo apoio financeiro.

Referências

LIU, J.; XU, Y.; GE, Y.; HOU, Z.; CHEN, S. Wire and arc additive manufacturing of metal components: a review of recent research developments. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 111, n. 1-2, p. 149-198, 2020a. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05966-8>.

LIU, Z. *et al.* Corrosion and high-temperature tribological behavior of carbon steel claddings by additive manufacturing technology. *Surface and Coatings Technology*, v. 384, 2020b. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.125325>.

MONTEVECCHI, F. *et al.* Heat accumulation prevention in Wire-Arc-additive-Manufacturing using air jet impingement. *Manufacturing Letters*, v. 17, p. 14-18, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2018.06.004>.

WU, B. *et al.* Effects of heat accumulation on the arc characteristics and metal transfer behavior in Wire Arc Additive Manufacturing of Ti6Al4V. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 250, p. 304-312, 2017.

YANG, D.; HE, C.; ZHANG, G. Forming characteristics of thin-wall steel parts by double electrode GMAW based additive manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 227, p. 153-160, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.08.021>.

EFEITO DO TRATAMENTO TÉRMICO EM SUPERFÍCIES REVESTIDAS COM INCONEL 625

Eliane Alves Kihara,¹ Demostenes Ferreira Filho,² José Lúcio Gonçalves Júnior³

Introdução

As aplicações das ligas metálicas são selecionadas com base nas suas propriedades mecânicas, resistência a corrosão, resistência ao calor, propriedades elétricas e magnéticas etc. Todas as características citadas dependem da estrutura cristalina ou granular e estão diretamente relacionados com a sua composição química e condições de fabricação. Assim, existe a necessidade de controle da estrutura metálica para a correta seleção e aplicação dos materiais metálicos (Chiaverini, 2008). Para isso, técnicas de revestimento de superfícies combinadas com tratamentos térmicos de superfícies vêm sendo realizados com o intuito de desenvolver procedimentos de revestimentos sistemáticos para a indústria de soldagem e superfícies a fim de se obter melhor relação performance x custo.

Nesse contexto, este trabalho tem por objetivo apresentar uma revisão bibliográfica das mudanças metalúrgicas de superfícies revestidas com Inconel 625 submetidas a tratamentos térmicos com a intenção de apresentar os benefícios da utilização da combinação da técnica de revestimento com tratamento térmico superficial.

1 Universidade Federal de Goiás – eliane_kihara@discente.ufg.br.

2 Universidade Federal de Goiás – demostenesferreira@ufg.br.

3 Universidade Federal de Goiás – jlucio@ufg.br.

Revestimento

Segundo Costa e Payão (1994), a soldagem de revestimento é um processo onde uma liga é depositada na superfície de um metal de base, ou para retorná-la às dimensões originais ou para obter alguma propriedade desejada, como resistência ao desgaste, ao impacto, à corrosão e fadiga. Neste contexto, segundo Silva *et al.* (2012), a soldagem de revestimento com superligas à base de níquel tem sido uma alternativa interessante, pois confere aos equipamentos uma alta resistência à corrosão com um custo inferior, se comparado à fabricação de componentes ou tubulações maciças com superligas. Desse modo, segundo XU *et al.* (2013) as aplicações ligadas à base de Níquel, como a liga Inconel 625 são utilizadas para aplicações que requerem alta resistência à corrosão e elevada resistência mecânica. A temperatura de trabalho pode variar desde valores negativos até elevadas temperaturas, como, por exemplo, em turbinas.

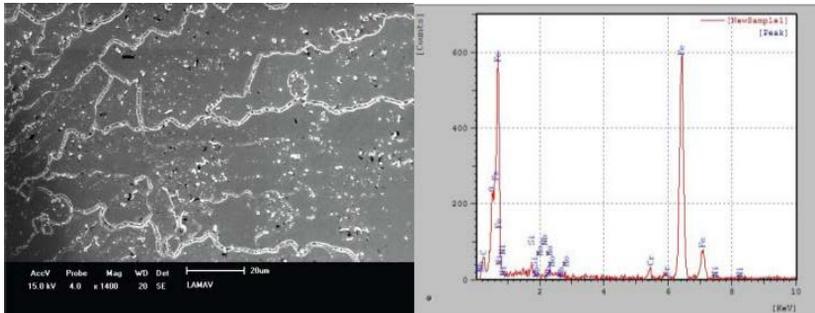
Assim, na próxima seção serão apresentados resultados metalúrgicos onde superfícies diversas foram revestidas com Inconel 625 por diversos processos de revestimento a arco e submetidas a tratamentos térmicos com o objetivo de manter as propriedades mecânicas do revestimento e aliviar as tensões na junta soldada.

Metalurgia

Em estudos de Soares *et al.* (2017), uma superfície de aço revestida com Inconel 625 pelo processo “TIG hot wire” automatizado foi submetida ao tratamento térmico de normalização 1100 °C por 60 minutos, e resfriamento ao ar, e solubilização a 1030 °C com aquecimento por indução eletromagnética por 30 segundos e resfriamento em água, obtiveram resultados onde o tratamento térmico de normalização não alterou a ZPD (zona parcialmente diluída) sob o ponto de vista microestrutural e a dureza média encontrada foi de 370 HV e a região de transição composta por microestrutura martensítica. Os autores observaram a mudança da morfologia da superfície após a normalização de dendrítica para estrutura granular. Na análise EDS observaram picos de Ni, Cr e Mo com valores

parecidos com a composição química do Inconel 625, evidenciando que a microestrutura do revestimento é a fase austenita. A Figura 1 aponta que foi evidenciada pelos autores uma elevada concentração de Nb, Ni e C, onde os precipitados da região, em sua maioria, são carbeto ricos em Nb.

Figura 1 - a) Precipitados formados nas camadas de revestimento após tratamento térmico de normalização. MEV. Aumento: 1400X; b) Análise EDS



a)

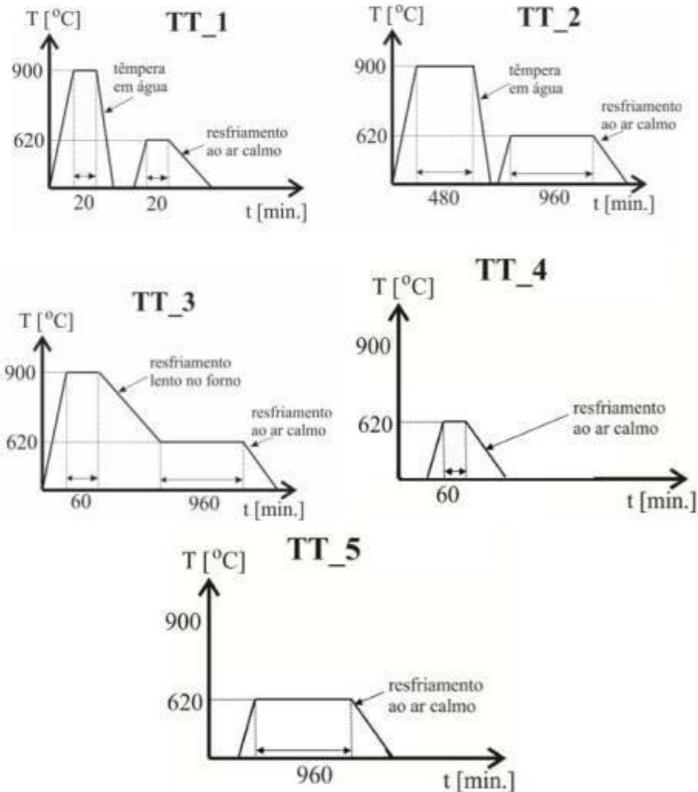
b)

Fonte: Soares *et al.* (2017).

Após a solubilização, os autores observaram que a microestrutura foi mantida dendrítica assim como a encontrada na condição como soldado, alternando entre celular, colunar e equiaxial em todas as camadas. Os autores apresentam também uma comparação entre as durezas obtidas, onde verificou-se uma diferença de 7% do tratamento térmico de solubilização com o de normalização. Por meio da análise EDS foi observada a presença de picos de Nb em grandes concentrações e a presença de Ni, Cr e Fe em menores proporções. A fase Laves tem como fórmula química mais comuns Fe_2Ti , Fe_2Nb e Fe_2Mo (Vort *et al.*, 2004). Esta composição química, com altos teores de Nb e Fe, como encontrada pelos autores, associada à morfologia do precipitado, leva a supor que os precipitados se trate de fase Laves.

Em estudos de Trindade *et al.* (2017), uma superfície revestida a Laser de aço C-Mn com Inconel 625 foi submetida à diversas rotas de tratamentos térmicos de acordo com a representação esquemática da Figura 2.

Figura 2 - Representação esquemática dos cinco tratamentos térmicos utilizados neste trabalho



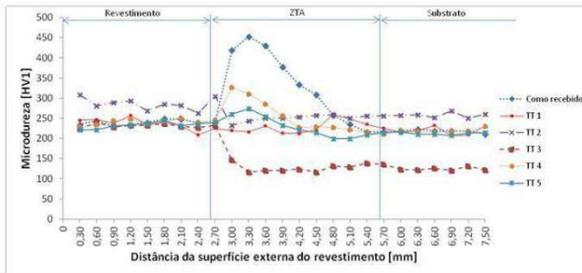
Fonte: Trindade *et al.* (2017).

Os autores observaram que o tratamento TT₁ mostrou que a microdureza do revestimento não sofreu alteração. A parte do substrato que não foi afetada termicamente pelo ciclo térmico da deposição também não sofreu alteração da dureza após TT₁. No entanto, a região afetada pelo ciclo térmico da deposição (ZTA) sofreu grande redução da dureza (de 453 HV para 230 HV). Isto se deu devido ao fato de que a bainita formada na ZTA durante a deposição foi completamente austenitizada durante TT₁ e martensita revenida foi formada após têmpera e revenimento.

Observando o tratamento TT₂ constataram que a microdureza do revestimento aumentou em média 30 HV em relação ao estado como re-

cebido (como depositado). A microdureza da ZTA reduziu significativamente, pela ocorrência do mesmo fenômeno já mencionado no TT_1. O tratamento TT_3 mostrou que o perfil de microdureza do revestimento não sofreu nenhuma considerável alteração devido ao curto tempo a 900 °C. Por outro lado, a microdureza da ZTA e do substrato sofreram uma forte redução causada pelo resfriamento lento no forno após austenitização, causando a formação de ferrita + perlita. O tratamento TT_4 mostrou que a microdureza do revestimento e do substrato não foram afetadas. Por outro lado, a microdureza da ZTA sofreu uma redução significativa causada pelo “revenimento” da bainita, ou seja, coalescimento dos carbonetos (Fe_3C). O tratamento TT_5 mostrou que a microdureza do substrato é praticamente igual ao estado como recebido, mas apresenta uma tendência à redução da dureza devido ao longo tempo de revenimento. Por outro lado, a microdureza da ZTA reduz significativamente, mostrando a influência do tempo de revenimento dos processos difusionais do carbono na bainita e causando coalescimento dos carbonetos. Os autores apresentaram por meio da Figura 3 todas as variações de microdureza em comparação com o recebido.

Figura 3 - Perfil de microdureza o estado como recebido (depositado) e após os cinco diferentes tratamentos térmicos



Fonte: Trindade *et al.* (2017).

Em estudos de Pereira *et al.* (2017) realizou-se o revestimento multicamada de substrato de aço inoxidável 304L por deposição de camadas de Inconel 625 por meio de processo CMT (Cold Metal Transfer), em que se analisou as amostras de sobreposição de cordões e na condição após tratamento térmico de homogeneização. O tratamento térmico de

homogeneização foi aplicado em uma das paredes e foi conduzido em forno mufla na temperatura de 1000 °C por um período de 8 horas. Na sequência, o forno foi desligado e a amostra permaneceu no interior até a temperatura ambiente.

A partir dos resultados, os autores identificaram que após tratamento térmico ocorre uma maior variação da dureza na seção transversal da camada, que exibe picos com um espaçamento cíclico. Em consequência, ocorre um aumento da dureza média em relação à condição como depositada de 226 HV para 256 HV após tratamento térmico. Assim, eles verificaram que a variação de dureza medida na seção transversal de uma camada pode estar associada à formação de fases de maior dureza como carbonetos e delta. Por meio da análise por EDS os autores observaram a presença de Nb, Mo e C, o que caracteriza a formação da fase de Laves, carbeto e da fase δ (delta) durante o tratamento térmico. A presença da fase delta, como já citado anteriormente, não é desejada, pois resulta na redução da tenacidade e ductilidade do material.

Conclusões

A partir dos estudos apresentados pode-se concluir que:

- De acordo com Trindade *et al.* (2017) dentre os 5 tratamentos térmicos realizados, os mais promissores em termos de performance foram apenas dois devido à manutenção das características originais do substrato e do revestimento e eliminação da zona dura (ZTA);
- Já de acordo com Soares *et al.* (2017) os resultados apresentados indicam que o tratamento de normalização e solubilização foram benéficos às propriedades da junta soldada: eliminou a ZTA do metal base, reduziu a dureza da ZPD e do revestimento e aparentemente transformou a fase laves em carbeto no revestimento de inconel 625;

- De acordo com Pereira *et al.* (2017), os resultados mostraram que o tratamento térmico minimizou as heterogeneidades da microestrutura com multicamadas promovendo um aumento na resistência mecânica, porém, com queda da ductilidade quando comparado à amostra na condição como processada;
- No contexto apresentado, pode-se dizer que a variação brusca de dureza na ZTA do substrato, causada pelo processo de deposição da liga Inconel não é desejável, pois esta variação acentuada de propriedades em uma extensão tão curta favorece o fenômeno de fadiga de contato, onde trincas podem nuclear preferencialmente por fadiga na região de baixa dureza da parede, depois da ZTA, o que pode promover o arrancamento da camada de Inconel com o tempo de serviço, deixando o aço exposto às condições corrosivas. Neste sentido, pode-se considerar que os melhores tratamentos são aqueles que diminuem o gradiente de dureza entre a liga depositada, ZTA e substrato. Assim, pode-se afirmar que os parâmetros adotados pelos autores citados nesse trabalho podem garantir maior resistência a fadiga de contato comparado com o substrato torando o processo de revestimento desejável em aplicações de engenharia.

Referências

CHIAVERINI, V. Tratamento térmico das ligas metálicas. São Paulo: ABM, 2008, 272 p.

COSTA, J. F. M.; PAYÃO-FILHO, J. C. Resistência ao desgaste abrasivo de revestimento de ferro fundido branco alta-liga soldado pelo processo arame tubular auto protegido. In: SEMINÁRIO BRASILEIRO DE MATERIAIS RESISTENTES AO DESGASTE, 3., 1994, Fortaleza. Anais [...]. Fortaleza, 1994. p. 181-200.

PEREIRA, H.; HENKE, S.; OLIVEIRA, A. Caracterização de Multicamadas de IN625 Depositadas por CMT. *Soldagem & Inspeção*, v. 23, n. 2, p. 235-246, 2018.

SILVA, C. C; AFONSO, C. R. M; RAMIREZ, A. J.; MOTTA, M. F.; MIRANDA, H. C.; FARIAS, J. P. Aspectos metalúrgicos de revestimentos dissimilares com a superliga à base de níquel Inconel 625. *Soldagem & Inspeção*, v. 17, n. 3, p. 251-263, 2012.

SOARES, J., TERRONES, L., PARANHOS, R. Efeito dos Tratamentos Térmicos de Normalização e de Solubilização na Microestrutura de uma Junta Dissimilar Soldada entre um Tubo de Aço API 5L X-52 e o Inconel 625. *Soldagem & Inspeção*, v. 22, n. 4, p. 357-373, 2017.

TRINDADE, V., SOUZA, E., PAULA, J., COSTA, M., FARIA, G. Efeito De Diferentes Tratamentos Térmicos Sobre Microestrutura E Microdureza De Um Sistema Aço C- Mn/Revestimento De Inconel 625. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, São Paulo, v. 14, n. 2, p. 167-174, 2017.

XU F.; LV, Y.; LIU, Y.; SHU, F.; HE, P.; XU, B. Microstructural evolution and mechanical properties of Inconel 625 alloy during pulsed plasma arc deposition process. *Journal of Materials Science and Technology*, v. 29, n. 5, p. 480-488, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2013.02.010>.

INFLUÊNCIA DO AJUSTE DA TAXA DE SUBIDA DA CORRENTE NA REGULARIDADE DO PROCESSO EM SOLDAGEM MIG/MAG POR CURTO-CIRCUITO

Weslei Rodrigues Niz,¹ Demostenes Ferreira Filho,² Daniel Souza³

Introdução

O processo de soldagem MIG/MAG é um processo amplamente utilizado na indústria pela sua alta capacidade de produção, devido à alimentação contínua do arame e alto valor de densidade de corrente que proporciona maior taxa de fusão. Um dos modos de operação deste processo é o modo de transferência por curto-circuito. Nesse modo, a transferência metálica ocorre quando a ponta líquida do arame-eletrodo toca a poça de fusão, causando um curto-circuito e a extinção do arco e, por ação da tensão superficial, o metal da ponta é transferido para a poça. Resumidamente, a transferência por curto-circuito ocorre quando a ponta líquida do arame eletrodo toca a poça de fusão, provocando o curto-circuito, que ocasiona a queda quase instantânea da tensão (apagamento do arco) e a subida da corrente, segundo Scotti e Ponomarev (2008, p. 135). Dependendo das configurações de tensão de soldagem e indutância, o arco pode se tornar

1 Universidade Federal de Goiás – niz_weslei@discente.ufg.br.

2 Universidade Federal de Goiás – demostenesferreira@ufg.br.

3 Universidade Federal de Goiás – daniel.souza@ufg.br.

tão longo que permitiria até a passagem ocasional de gotas em voo livre. Assim que a gota é transferida, o arco reabre e a tensão sobe até o valor de referência e a corrente cai. A velocidade de subida e descida da corrente, durante o curto-circuito, é comandada pela indutância do circuito.

Indutor é um dispositivo elétrico capaz de armazenar energia na forma de campo magnético. Com a mudança da corrente no indutor, produz-se outra corrente contrária à tendência de mudança, no sentido de evitar a variação desse campo, e como resultado tem-se uma corrente de subida ou de descida amortecida. Fontes convencionais de soldagem realizam o controle da indutância por meio de um indutor ligado em série com o arco, onde para se variar a indutância se varia a quantidade de bobinas conectadas, já nas fontes eletrônicas isso é feito artificialmente. Durante a soldagem é impossível saber a indutância real, pois, além da regulagem na fonte, condições diversas de soldagem também influenciam na indutância, posição reforçada por Souza *et al.* (2011). A melhor forma de se fazer referência à indutância de um equipamento é pelo termo “efeito indutivo”, pois a indutância do sistema não depende só da fonte, mas também do arco.

O objetivo do presente trabalho é verificar a influência do ajuste da taxa de subida da corrente, regulada na fonte, em função do gás de proteção, na regularidade do processo.

Metodologia

Para soldagem foi utilizada uma fonte eletrônica regulada no modo tensão constante. As soldagens foram realizadas com o arame-eletrodo AWS ER70S-6 com 1,2 mm de diâmetro. Os gases de proteção foram 100% Ar, 25% CO₂ + 75% Ar e 100% CO₂. A escolha dos gases se deu para avaliar a influência do teor de CO₂ na regularidade do processo.

Para cada gás proposto, a tensão e velocidade de alimentação foram reguladas de forma que inicialmente a transferência se desse por curtos-circuitos. A velocidade de alimentação foi regulada em 3 m/min e a tensão foi ajustada de forma que o arco ficasse curto e visualmente com mesmo comprimento para todos os gases testados.

O valor do ajuste da taxa de subida da corrente para determinação dos parâmetros foi arbitrado em 80. O ajuste da taxa de subida foi variado de valores baixos (a fonte permite variações entre 0 e 300) e aumentava-se até que se percebesse uma tendência de mudança da transferência de curto-circuito para globular.

Foram coletados valores de corrente e tensão a uma taxa de 5 kHz. Utilizando os dados coletados e um programa desenvolvido pelo Grupo Laprosolda da Universidade Federal de Uberlândia (Souza *et al.*, 2009) foi calculado o índice de regularidade do processo.

Resultados e discussão

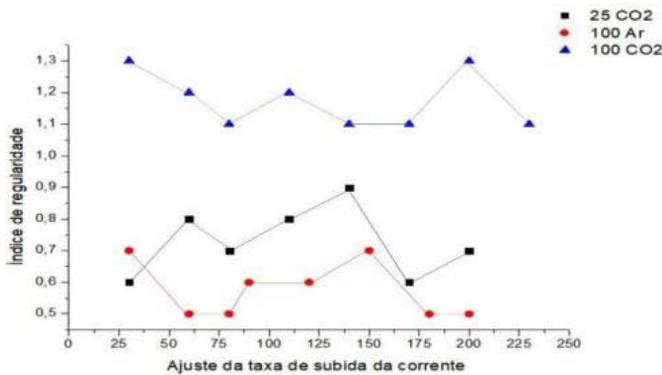
A Tabela 1 apresenta os valores dos parâmetros e condições de soldagem ajustados/regulados. A distância bico de contato-peça foi ajustada em 12 mm e a vazão do gás em 16 l/min. A Figura 1 apresenta as curvas do índice de regularidade em função do ajuste da taxa de subida da corrente e do gás de proteção. Observa-se que não há uma tendência de variação da regularidade com o aumento do ajuste da taxa de subida. Por outro lado, observa-se que a regularidade do processo (transferência metálica) piora com o aumento do teor de CO₂ no gás (quanto maior o valor do índice, pior).

Tabela 1 - Parâmetros de soldagem utilizados nos testes

Tensão de referência (V)	Velocidade de alimentação (m/min)	Gás de proteção
20	3,0	100% Ar
22	3,0	25% CO ₂ + 75% Ar
24	3,0	100% CO ₂

Fonte: Elaboração própria.

Figura 1 - Índice de regularidade em função do ajuste da taxa de subida da corrente



Fonte: Elaboração própria.

Conclusões

Considerando os experimentos realizados, pode-se concluir que não se verifica uma tendência de variação da regularidade do processo com a variação do ajuste da taxa de subida da corrente. Também pode-se concluir que o teor de CO_2 no gás de proteção altera o comportamento da regularidade do processo, piorando esta com o aumento daquele teor.

Referências

SOUZA, D. *et al.* Manual de Utilização do Programa de Análise de Curto-Circuito para Determinação da Estabilidade de Transferência no Processo de Soldagem MIG/MAG. *Relatório Interno Laprosolda/UFU 13/2009*. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2009, 9p.

SOUZA, D.; ROSSI, M. L.; KEOCHEGUERIAN, F. *et al.* Influência da regulagem de parâmetros de soldagem sobre a estabilidade do processo MIG/MAG operando em curto-circuito. *Soldagem & Inspeção*, v. 16, n. 1, p. 22-32, jan./mar. 2011.

SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. (ed.). *Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho*. 2. ed. São Paulo: Artliber Editora; 2008.

ANÁLISE DE APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE VELOCIMENTRIA DE IMAGEM DE PARTÍCULA – PIV PARA DESENVOLVIMENTO DE APARATO EXPERIMENTAL DE BAIXO CUSTO

Anderson Gomes Girardi,¹ João Paulo Da Silva Fonseca²

Introdução

O estudo de Velocimetria de Imagem de Partículas - PIV originou-se há aproximadamente 5 décadas. Este método óptico permite a visualização e a análise do movimento de partículas em diferentes fluidos e escoamentos, destacando-se a vantagem de avaliação de um campo inteiro de movimento. A técnica PIV representa um importante desenvolvimento da mecânica dos fluidos experimental moderna, tornando-se um procedimento de medição essencial em dinâmica dos fluidos com aplicações em institutos de pesquisa, laboratórios, grandes indústrias automobilísticas e aeroespaciais.

Nas últimas quatro décadas, a PIV evoluiu substancialmente para uma técnica de medição poderosa e significativa. Isso foi possível não apenas pela criatividade, entusiasmo e comprometimento dos desenvolvedores, mas também pelas conquistas técnicas no campo de partículas traçadoras,

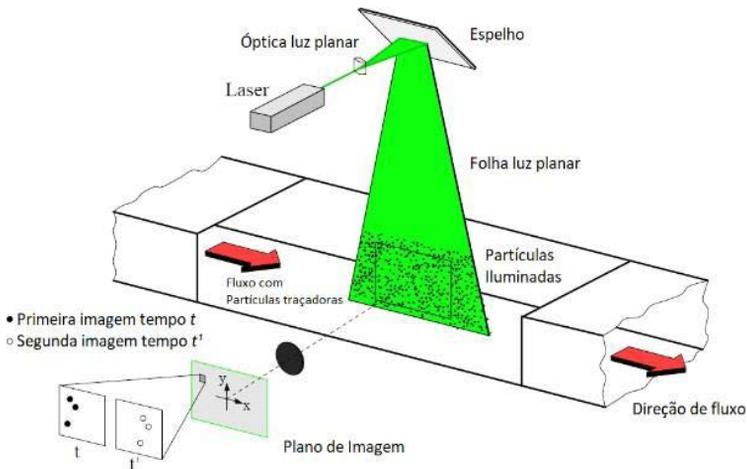
1 Universidade Federal de Goiás – andersongomes@ufg.br

2 Universidade Federal de Goiás – jpsfonseca@ufg.br

fontes de luz, sistemas de gravação, algoritmos e performance de computador (Scharnowski; Kahler, 2020).

Basicamente, a Figura 1 representa o conjunto experimental da técnica de velocimetria de imagem de partículas (PIV-2D) em túnel de vento, sendo composto por um semeador de partículas traçadoras, um laser multipulsado equipado com um arranjo óptico com a função de converter o feixe de luz em uma folha de luz planar, uma câmera de alta velocidade, um sincronizador para controle do tempo de disparo do laser e captura das imagens, além de um *software* para processamento.

Figura 1 - Configuração experimental para aplicação da técnica PIV-2D



Fonte: Traduzido de Kompenhans (2000).

Conforme destaca Raffel *et al.* (2007), um aparato experimental para a aplicação da técnica PIV pode ser preparado por meio da combinação de equipamentos de fabricantes diferentes ou realizando a aquisição de sistemas comerciais completos.

No entanto, a aquisição de um sistema completo ou até mesmo de um item isolado se torna uma barreira devido ao seu custo relativamente alto. Desta forma, poucas instituições podem ostentar a utilização da técnica no ensino ou na pesquisa. Em contrapartida, existe uma movimentação e um grande progresso para o desenvolvimento de PIV de baixo custo para aplicações industriais e educacionais.

Metodologia

De forma alternativa, Cierpka *et al.* (2016), Käufer *et al.* (2021), Minichiello *et al.* (2020) revelam que uma configuração experimental de baixo custo pode ser realizada através de smartphones ou até mesmo câmeras fotográficas de menor custo com sensores CMOS ou CCD para captura e gravação de vídeo com alta taxa de quadros. Para iluminação das partículas é possível a utilização de laser cw - *continuous wave*, com emissão de luz contínua com menor potência e até mesmo a utilização de lâmpadas de led de alta potência. Já o processamento dos dados pode ser realizado por *softwares* livres ou aplicações *open source* para MatLab®, completamente satisfatórios para aplicações em duas dimensões.

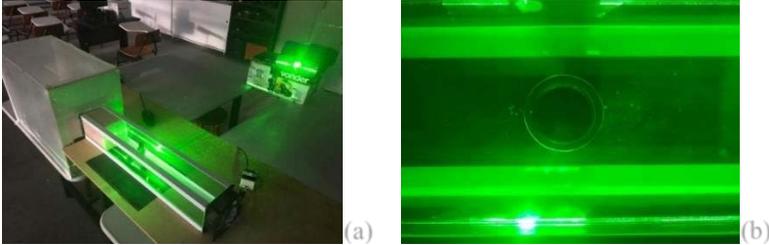
Inicialmente, os ensaios experimentais com caráter de aprendizagem, análise e aprimoramento da técnica PIV estão sendo executados com equipamentos disponíveis nos laboratórios da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação – EMC conforme Figura 2a. Foi construído um túnel de vento em vidro *clearglass* com comprimento de 600 mm e seção de teste quadrada de 102 mm. Foi utilizada uma máquina de fumaça para visualização de fluxo laminar no túnel. Além disso, uma análise de velocimetria pontual foi adquirida com um Termo-anemômetro Testo 405i Smart. Foi posicionado um cilindro com diâmetro de 30 mm no centro da seção conforme Figura 2b, com o objetivo de analisar o fluxo próximo a região circular.

A semeadura das partículas foi realizada em caráter experimental com várias substâncias, dentre as quais podemos destacar dióxido de titânio (TiO_2), dióxido de silício (O_2Si) e dolomita ($CaMg(CO_3)_2$), com dimensões de aproximadamente 25 μm . Já a aquisição das imagens é realizada através de uma câmera fotográfica profissional Casio Exilim Ex-F1, a qual pode realizar gravações de vídeo com até 1200 frames por segundo, porém com resolução de 336×96 pixels, representando um campo de visão de 60×17 mm. O processamento das imagens é realizado no PIVlab, que atualmente é o aplicativo mais popular de código aberto para MATLAB®.

Resultados e discussão

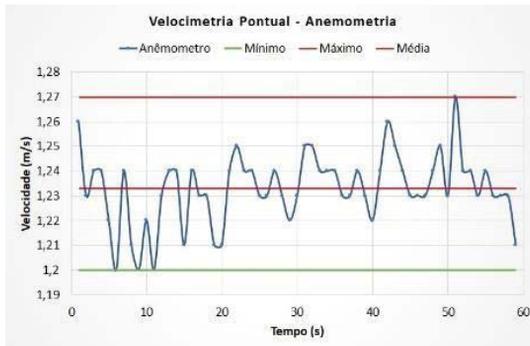
A velocimetria pontual na seção central do túnel na interface planar do laser obteve um valor médio de 1,232 m/s conforme a Figura 3.

Figura 2 - Aparato experimental realizado em laboratório da EMC – UFG



Fonte: Elaboração própria.

Figura 3 -Velocimetria pontual obtida em experimento utilizando anemômetro de fio quente

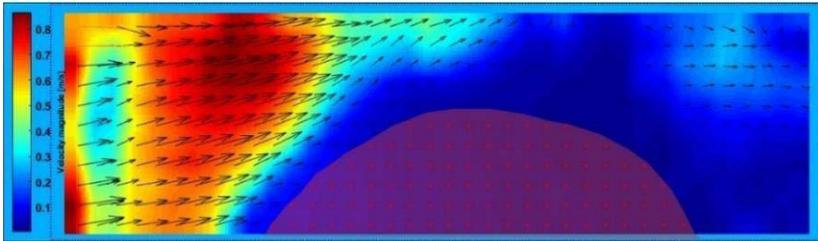


Fonte: Elaboração própria.

A análise do campo vetorial obtido no PIVlab com o cilindro é demonstrada na Figura 4. O processamento foi configurado com *Fast Fourier Transform – FFT-2D*; com área de interesse de 32×32 e 16×16 pixels e sobreposição de 50%, a média de velocidade do campo vetorial foi obtida com 500 imagens. É possível visualizar diferentes velocidades próximo à área do cilindro, a região a montante demonstra os vetores de cor vermelho-escuro com magnitude maior. Já na área a jusante os vetores da cor azul representam as menores velocidades, incluindo regiões com vorticidade. O

software PIVLAB obteve resultados qualitativos, além disso os resultados quantitativos se divergem em torno de 30% da velocimetria pontual que devem ser melhor analisados com experimentos posteriores.

Figura 4 - Campo vetorial de fluxo - PIV



Fonte: Elaboração própria.

Conclusões

Os ensaios experimentais preliminares são de fundamental importância para definição de equipamentos e conhecimento das limitações da técnica. Além disso, com o estudo inicial é possível definir a metodologia que será utilizada para aplicação da técnica PIV de baixo custo para fluxo de ar em túnel de vento.

Ainda mais, destaca-se que os pesquisadores devem ser criteriosos ao realizar uma técnica de medição PIV, e o conhecimento das características da aplicação é fundamental para direcionar a especificação de instrumentos necessários.

Agradecimentos

Os autores agradecem a FURNAS Centrais Elétricas e ao “Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico” (P&D) da ANEEL pelo apoio financeiro.

Referências

SCHARNOWSKI, S.; KÄHLER, C. J. Particle image velocimetry - Classical operating rules from today's perspective. *Optics and Lasers in Engineering*, v. 135, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2020.106185>.

KOMPENHANS, J. *et al.* Particle Image Velocimetry in aerodynamics: Technology and applications in wind tunnels. *Journal of Visualization*, v. 2, p. 229-244, 2000. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF03181440>.

CIERPKA, C.; HAIN, R.; BUCHMANN, N. A. Flow visualization by mobile phones cameras. *Experiments in Fluids*, v. 57, n. 6, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00348-016-2192-y>.

KÄUFER, T.; KÖNG, J.; CIERPKA, C., Stereoscopic PIV measurements using low-cost action cameras. *Experiments in Fluids*, v. 62, n. 3, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00348-020-03110-6>.

MINICHIELLO, A. *et al.* Developing a mobile application-based particle image velocimetry tool for enhanced teaching and learning in fluid mechanics: A design-based research approach. *Computer Applications in Engineering Education*, v. 29, n. 3, p. 517-537, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/cae.22290>.

RAFFEL, M.; WILLERT, C. E.; WERELEY, S. T.; KOMPENHANS, J. *Particle Image Velocimetry: A Practical Guide*. [S. l.]: Springer, 2007.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SISTEMÁTICA DE ESFORÇOS ESTRUTURAIS E DANOS EM TURBINAS EÓLICAS

Pedro Augusto Dias Rodrigues,¹ Marlipe Garcia Fagundes Neto²

Introdução

O objetivo deste trabalho é realizar uma revisão bibliográfica sobre os efeitos dos esforços gerados por cargas de vento e vibrações sobre uma estrutura de turbina eólica. A grande incógnita de projeto desses equipamentos são os efeitos estruturais na haste que sustenta o Nacele (caixa de câmbio onde estão conectados o gerador e o Hub que sustenta as hélices). A haste sofre avarias severas por subdimensionamento ou efeitos de vibração excessiva do sistema entre outras causas, dessa forma, o objetivo será estudar esta região da turbina.

Existem inúmeros estudos a respeito da análise dinâmica e estática de turbinas eólicas, bem como seus efeitos ao longo dos anos. As turbinas eólicas em geral são projetadas para durar cerca de 20 anos (segundo o fabricante Vestas), porém observa-se que a prática condena estruturas com condições de vida muito reduzidas em relação às condições de projeto devido a efeitos de vibração, carga de flambagem excessiva e a própria fadiga e fluência do material.

1 Universidade Federal de Goiás – pedro93dias27@gmail.com.

2 Universidade Federal de Goiás – marlipe@ufg.br.

Inicialmente foram estudados os modelos de turbinas existentes e os trabalhos existentes nessa área de geração de energia, como os apresentados por Kamirad (2013)., em que se estuda os efeitos das cargas de vento em turbinas eólicas em alto mar. Foi realizado um trabalho inicial de levantamento de informações e revisão bibliográfica a respeito do tema. O modelo mais conhecido é o do tipo HAWT, em que a turbina é vertical, conforme mostrado na Figura 1.

Figura 1 - Fotografia de um modelo de turbina HAWT



Fonte: Sartor (2021).

Metodologia

A base para a metodologia de revisão foi a utilização da plataforma de pesquisa científica da Comunidade Acadêmica Federada (CAFe) e acesso remoto ao Portal de Periódicos CAPES. Foram utilizadas as bases de dados da ScienceDirect, Scopus e Web of Science. Foi realizada uma padronização nas buscas, filtrando-se apenas resultados referentes a engenharia, cujas palavras-chaves foram: Turbina Eólica, Esforços Estruturais, Detecção de danos, e Strain Gauge.

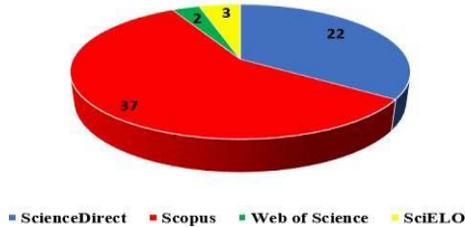
Resultados e discussão

Os resultados foram refinados por assunto semelhantes e por data de publicação, sendo selecionados artigos de 2010 em diante apenas. Inicialmente foram obtidos 262 artigos, dos quais foram separados 64 artigos. Para tanto, a métrica utilizada foi a ênfase nos efeitos estruturais causados por cargas de vento sobre a estrutura.

A distribuição dos artigos encontrados pode ser visualizada na Figura 2.

Figura 2: Distribuição dos artigos pesquisados

Distribuição dos Artigos Pesquisados



Fonte: Elaboração própria.

Conclusões

Segundo a metodologia sistemática de análise dos artigos por palavras-chave, e depois por assunto, os artigos mais importantes obtidos na revisão bibliográfica foram:

- OLIVEIRA, G.

Título: Dynamic monitoring system for utility-scale wind turbines: damage detection and fatigue assessment.

Publicado em: Journal of Civil Structural Health Monitoring

Citações: 4

Ano de Publicação: 2017

- K. Molina, D. Ortega, M. Martínez, W. Pinto-Hernández, O. A. González-Estrada

Título: Modelado de la interacción fluido estructura (FSI) para el diseño de una turbina eólica HAWT

Publicado em: Revista UIS Ingenierías.

Citações: 8

Ano de Publicação: 2017

- KAMIRAD, M.

Título: Modeling aspects of a floating wind turbine for coupled wave-wind-induced dynamic analyses.

Publicado em: Renewable Energy Journal

Citações: 53

Ano de Publicação: 2013

- Santo, G.; Peeters, M.; Van Paepegem, W.; Degroote, J.

Título: Dynamic load and stress analysis of a large horizontal axis wind turbine using full scale fluid-structure interaction simulation.

Publicado em: Renewable Energy Journal

Citações: 17

Ano de Publicação: 2019

Agradecimentos

Os autores agradecem a FURNAS Centrais Elétricas e ao “Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico” (P&D) da ANEEL pelo apoio financeiro.

Referências

KAMIRAD, M. Modeling aspects of a floating wind turbine for coupled wave-wind-induced dynamic analyses. *Renewable Energy*. Norway, v. 53, p. 299-305, May 2013.

MOLINA, K.; ORTEGA, D.; MARTÍNEZ, M.; PINTO-HERNÁNDEZ, W.; GONZÁLEZ-ESTRADA, O. A. Modelado de la interacción fluido estructura (FSI) para el diseño de una turbina eólica HAWT. *Revista UIS Ingenierías*, v. 17, n. 2, p. 269-282, 2018. DOI: <https://doi.org/10.18273/revuin.v17n2-2018023>.

OLIVEIRA, G. Dynamic monitoring system for utility-scale wind turbines: damage detection and fatigue assessment. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, v. 7, n. 5, p. 657-668, 2017. DOI 10.1007/s13349-017-0250-7.

SANTO, G; PEETERS, M.; VAN PAEPEGEM, W; DEGROOTE, J. Dynamic load and stress analysis of a large horizontal axis wind turbine using full scale fluid-structure interaction simulation. *Renewable Energy*, v. 140, p. 212-226, September 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.03.053>.

SARTOR, V. Siemens Gamesa fecha mega acordo de 465 MW no Brasil para sua turbina eólica onshore mais potente. *FULL ENERGY*, [S. l.], 07 jan. 2021. Disponível em: <https://fullenergy.grupomidia.com/siemens-gamesa-fecha-mega-acordo-de-465-mw-no-brasil-para-sua-turbina-eolica-onshore-mais-potente/>. Acesso em: 18 nov. 2021.

OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS DE VENTILAÇÃO E AR-CONDICIONADO USANDO DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL

Júlio Modesto Beghelli,¹ Felipe Pamplona Mariano²

Introdução

A modelagem matemática e numérica de fenômenos físicos, relacionados com a movimentação de escoamentos de fluidos pode ser estudada com as técnicas de Dinâmica dos Fluidos Computacional, do inglês “Computational Fluid Dynamics” (CFD). Os pesquisadores dessa área buscam representar, com maior confiabilidade possível, a movimentação de diversos tipos de escoamentos (Çengel; Cimbala, 2011; White; Corfield, 2006). A partir dessas Análises, é possível entender fenômenos físicos e desenvolver equipamentos otimizados.

Dentre essa diversidade de aplicações, na execução do presente trabalho pretende-se utilizar as técnicas de CFD para simular escoamentos provindos de diferentes aparelhos de ar-condicionado e sistemas de ventilação e exaustão instalados em diferentes locais.

A principal ideia é analisar a distribuição do ar-condicionado por dois aspectos, sendo o primeiro o aspecto energético, em que se espera con-

1 Universidade Federal de Goiás – juliomodesto@discente.ufg.br.

2 Universidade Federal de Goiás – fpmariano@ufg.br.

dicionar o ar ambiente o mais rápido possível de forma a minimizar o tempo de uso dos compressores frigoríficos. Ao mesmo tempo, pretende-se entender a movimentação do escoamento, identificando regiões com recirculações, as quais são potencialmente prejudiciais à saúde, pois mantêm a mesma massa de ar recirculando no ambiente, não promovendo a adequada renovação (Anvisa, 2006; ABNT, 2008).

O sistema de ventilação é um dos responsáveis por garantir a qualidade do ar em um ambiente e atender as demandas de conforto, tendo em vista que a circulação do ar retira partículas e outros poluentes presentes na parte interna de um ambiente climatizado (Sornes, 2011). Além disso, é preciso projetar e posicionar adequadamente os aparelhos de ar-condicionado, tanto no insuflamento, quanto na exaustão, pois dessa forma garante-se a qualidade do ar no ambiente evitando a proliferação de microrganismos, como bactérias e fungos, além de manter, em níveis apropriados, os níveis de CO₂, vírus e outros contaminantes (Anvisa, 2006).

Metodologia

A primeira etapa em um projeto de CFD é identificar o modelo matemático que melhor representa o problema a ser estudado, para tanto, lança-se mão das equações de Navier-Stokes, da Conservação de Massa e a equação da Energia (White; Corfield, 2006). Estas três equações modelam de forma adequada o problema a ser estudado. Destaca-se que, normalmente, para se ter a maior eficiência energética, o escoamento deve estar em regime turbulento, enquanto que para manter o conforto térmico dos usuários do ambiente e conter o espalhamento de microrganismos no ambiente, de forma a manter a qualidade do ar, deve-se ter o menor nível possível de turbulência.

A segunda fase é escolher os métodos numéricos adequados para resolver as equações acima descritas, dentre os vários métodos à disposição, destacam-se os métodos das Diferenças Finitas (Fortuna, 2012) e o método dos Volumes Finitos (Maliska, 2010). Após a escolha do método numérico, faz-se uma sequência de procedimentos numéricos para validar o uso desses métodos, tanto na implementação quanto no uso dos mesmos,

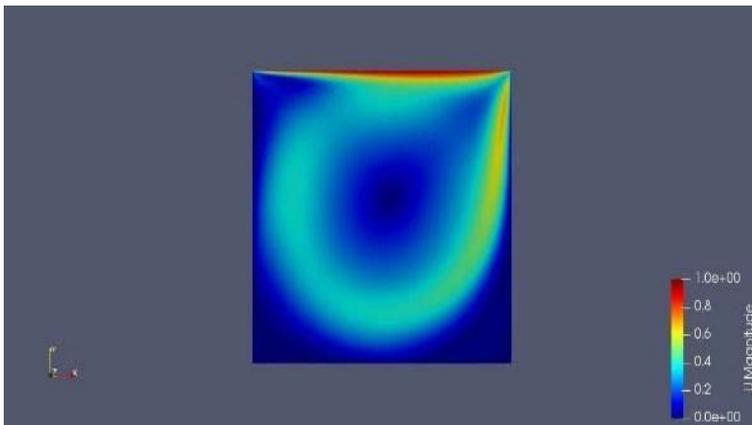
passando principalmente pelo estudo de convergência de malha e convergência numérica temporal, fazendo uso de problemas conhecidos de CFD, os quais têm soluções analíticas e numéricas providas de outros autores (Marini *et al.*, 2012).

A terceira fase consiste em implementar o domínio real a ser estudado e tentar impor as condições de contorno mais adequadas de alguns ambientes a serem climatizados. Após as simulações, promover um processo de otimização do sistema de ventilação. Para tanto, deve ser usada a técnica do planejamento fatorial com auxílio de metamodelos para cada ambiente.

Resultados e discussão

Como parte inicial do projeto, simulações no *software* OpenFOAM são necessárias para aplicação dos conceitos básicos e utilização das principais ferramentas da Dinâmica dos Fluidos Computacional. Em um primeiro momento é simulado um caso de escoamento em uma cavidade com tampa deslizante para um fluido com Número de Reynolds equivalente a dez mil, conforme apresentado na Figura 1 a seguir:

Figura 1 - Escoamento Em Uma Cavidade Com Tampa Deslizante.



Fonte: Elaboração própria.

Com a simulação, é possível verificar o perfil de velocidade do escoamento e as zonas de recirculação. Essas características são importantes no estudo de otimização de sistemas de ventilação e ar-condicionado, pois indica o comportamento do fluido no ambiente. A estratégia usada para ventilar um ambiente determina a qualidade da climatização interna e a quantidade de gasto energético para atingir os requisitos da ventilação.

Desta forma, a análise do escoamento aplicando a Dinâmica dos Fluidos Computacional auxilia na elaboração de cenários termicamente confortáveis e com qualidade do ar segundo as normas técnicas.

Conclusões

O presente trabalho apresenta soluções que estão de acordo com as demandas de sustentabilidade e a busca por conforto. O correto dimensionamento e posicionamento de sistemas de ventilação e ar-condicionado não só satisfaz no quesito economia de energia, como também no âmbito de conforto térmico e de qualidade do ar para os ocupantes. Portanto, a dinâmica dos fluidos computacional é uma importante ferramenta no auxílio da otimização de sistemas de ventilação e ar-condicionado.

Referências

- AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. *Serviços Odontológicos: Prevenção e controle de riscos*. Brasília, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Instalações de ar-condicionado – Sistemas centrais e unitários*. Parte 1: Projetos das Instalações: NBR 16401-1 Rio de Janeiro, 2008.
- ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. *Mecânica Dos Fluidos: Fundamentos e Aplicações*. 6. ed. Porto Alegre: McGraw-Hill Companies, 2011.
- MARINI, M. *et al*. Verification and Validation in Computational Fluid Dynamics: the FLOWNET Database Experience. *JSME International Journal - Series B*, [S. l.], v. 45, n. 1, p. 15-22, 2002.

SORNES, K. *Heating and Ventilation of Highly Energy Efficient Residential Buildings: Environmental Assessment of Technology Alternatives*. 2011. Thesis (Master of Science in Energy and Environment) – Nowergian University of Science and Technology, Trondheim, 2011.

WHITE, F. M.; CORFIELD, I. *Viscous Fluid Flow*. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 2006.

SOLUÇÃO NUMÉRICA DA EQUAÇÃO DE BURGERS ENVOLVENDO MÉTODOS PSEUDOESPECTRAL DE FOURIER E FRONTEIRA IMERSA

Jéssica Luana da Silva Santos,¹ Adailton Silva Borges,²

Andreia Aoyagui Nascimento³

Introdução

Burgers (1948), em seus estudos sobre turbulência em fluidos, propôs uma equação que serve como modelo básico para diversos fenômenos nos quais os efeitos de advecção não lineares e difusão linear desempenham um fator importante. A equação, no espaço físico, é definida por:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = \nu \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (1)$$

A equação (1) é similar à equação de Navier-Stokes, unidimensional sem o termo gradiente pressão, sendo uma entre as poucas equações diferenciais parciais não lineares que possui solução analítica, proposta por Whitham (1974 *apud* Canuto *et al.*, 1988):

1 Universidade Federal de Goiás – santosjessica@discente.ufg.br.

2 Universidade Tecnológica Federal do Paraná – adailton@professores.utfpr.edu.br.

3 Universidade Federal de Goiás – aanascimento@ufg.br.

$u(x, t) = c + u_b(x, t)$	(2)
$u_b(x, t) = -2\nu \frac{\partial \Phi(x-ct, t+1)}{\partial x} \Phi(x-ct, t+1)$	(3)
$\Phi(x, t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{-\frac{[x-(2n+1)\pi]^2}{4\nu t}}$	(4)

onde c é a velocidade de fase ($c = 4,0$ m/s), x é a posição no eixo das abscissas $[-\pi, \pi]$, t é o tempo, o qual varia de 0 a $\pi/8$ s, ν é a viscosidade cinemática ($\nu = 0,2$ m²/s) e n é o contador do somatório.

As equações 1 a 4 são utilizadas em processos de transferência de calor, massa e quantidade de movimento, com aplicações desde a Fluidodinâmica à Engenharia de Tráfego.

Neste trabalho, utilizou-se 16 a 512 pontos de colocação para a discretização da malha para as soluções analítica e numérica, empregando CFL de 0,01 e avanço temporal por Runge-Kutta clássico a fim de comparar a convergência do acoplamento dos métodos.

Metodologia

A metodologia abordada é o Método Pseudoespectral de Fourier (MPFO) acoplado com a Fronteira Imersa (MFI). De acordo com Mariano (2011), a implementação dos dois métodos torna-se necessária para funções não periódicas.

O MPFO transforma as EDP's para o domínio espectral por meio da Transformada de Fourier Discreta, tais mudanças de representação são muito úteis ao evitar a solução dos termos não lineares por meio da resolução da integral de convolução.

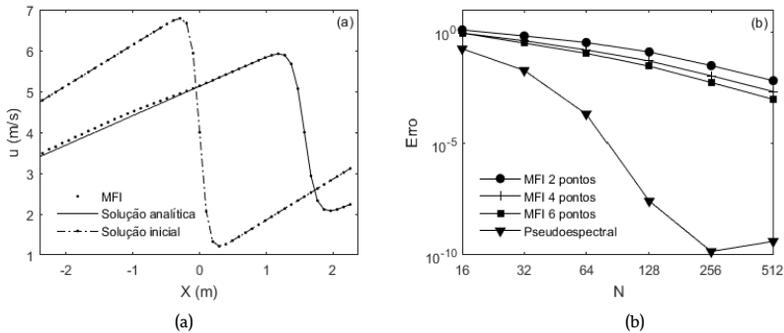
Segundo Canuto *et al.* (2006), o termo não linear pode ser tratado de três formas: advectiva, divergente e antissimétrica, sendo as três matematicamente idênticas se o divergente do campo vetorial for nulo. A forma antissimétrica é dada pela média aritmética das formas advectiva e divergente. Mais detalhes em Mariano (2011) e Nascimento (2016).

O MFI trabalha com dois domínios de cálculo, usando uma descrição Euleriana para o fluido e uma descrição Lagrangiana para a condição de contorno. Considera-se neste trabalho que os pontos lagrangianos e eulerianos são coincidentes para comparação com os resultados apresentados em Nascimento *et al.* (2014). Para tanto, foi desenvolvido um código implementado na linguagem Fortran 90, sendo usado o *software* Octave para a geração dos gráficos.

Resultados e discussão

A solução numérica para a equação de Burgers em um domínio não periódico é representada na Figura 1a, com 64 pontos de colocação, CFL de 0,01 e com 3 pontos de cada lado da zona de forçagem, plotando apenas o domínio útil.

Figura 1 - (a) Solução da equação de Burgers; (b) Erro máximo no tempo final



Fonte: Elaboração própria.

A Figura 1b representa o erro máximo obtido com o MFI no tempo $\pi/8$ s. Percebe-se que acrescentando mais números de pontos na fronteira imersa aumenta-se a acurácia da solução numérica. Conforme Santos *et al.* (2021), o MPFO é um método de alta convergência numérica, utilizando as metodologias em conjunto houve um decréscimo na ordem de convergência, entretanto ampliou-se o alcance de solução para outros problemas com condições de contorno não periódicas.

Conclusões

O método pseudoespectral acoplado à Fronteira Imersa é capaz de simular escoamentos sobre geometrias complexas e para problemas não periódicos. Conclui-se que a convergência do MPFO decresce com MFI, todavia possui tendência de método de segunda ordem e apresenta ainda boas aproximações.

Agradecimentos

Os autores agradecem a FURNAS Centrais Elétricas e ao “Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico” (P&D) da ANEEL pelo apoio financeiro.

Referências

- BURGERS, J. M. A mathematical model illustrating the theory of turbulence. *Advances in Applied Mechanics*, v. 1, p. 171-196, 1948.
- CANUTO, C. *et al.* Spectral Methods in Fluid Dynamics. Berlin: Springer-Verlag, 1988. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-84108-8>.
- CANUTO, C. *et al.* Spectral Methods: Fundamentals in Single Domain. Berlin: Springer-Verlag, 2006.
- MARIANO, F. P. *Soluções Numéricas de Navier-Stokes Utilizando uma Híbridaçã das Metodologias Fronteira Imersa e Pseudo-Espectral de Fourier*. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, 2011.
- NASCIMENTO, A. A. *et al.* A comparison of Fourier pseudospectral method and finite volume method used to solve the Burgers equation. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v. 36, n. 4, p. 737-742, 2014.
- NASCIMENTO, A. A. *Métodos pseudoespectral de Fourier e fronteira imersa aplicados a escoamentos simplificados de engenharia de perfuração*. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, 2016.
- SANTOS, J. L. S. *et al.* Análise e implementação do método pseudoespectral de Fourier. In: CONGRESSO DE PESQUISA, ENSINO E EXTENSÃO, 18., 2021, Goiânia. *Anais [...]*. Goiânia: Universidade Federal de Goiás, 2021.

AERODINÂMICA DE TURBINAS EÓLICAS DE EIXO VERTICAL: ESTADO DA ARTE

Lucas Marques Monteiro,¹ Felipe Pamplona Mariano²

Introdução

As modernas turbinas eólicas, comumente chamados de aerogeradores, operam pelo princípio da força de sustentação, responsável por produzir um torque positivo em um eixo, submetendo-o ao movimento rotativo.

Figura 1 - (a) Turbina de eixo vertical de pás retas; (b) Turbina de eixo vertical de pás curvadas.



a)



b)

Fonte: Gipe (2021).

1 Universidade Federal de Goiás – lucas_monteiro@discente.ufg.br.

2 Universidade Federal de Goiás – fpmariano@ufg.br.

As turbinas de eixo vertical (Figura 1), objeto de estudo do presente trabalho, têm se mostrado um eficiente dispositivo de conversão e transferência de energia com diversas aplicações, dentre elas: produção de energia elétrica, bombeamento e dessalinização de água. Entre as vantagens das turbinas verticais, a principal é a sua capacidade de conseguir impor o movimento rotativo ao rotor independente da direção das correntes de ar, sem a necessidade de mecanismos de guinada.

As turbinas Darrieus de pás retas (Figura 1a) e as turbinas Darrieus de pás curvadas (Figura 1b), são turbinas de eixo vertical que operam pelo princípio de sustentação. O objetivo do presente trabalho é apontar as variáveis de investigação e pesquisa que fazem parte do projeto aerodinâmico desses modelos de turbinas e que são influenciadas pelos fenômenos fluidodinâmicos relacionados ao seu movimento rotativo.

Revisão bibliográfica

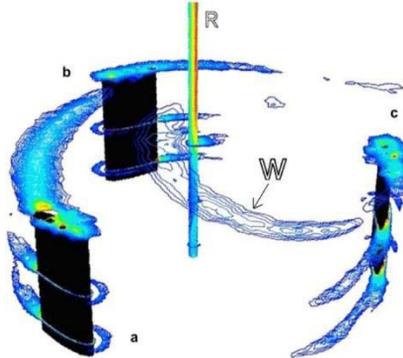
Inicialmente, a predição do comportamento e desempenho aerodinâmico das turbinas de eixo vertical eram realizadas com modelos analíticos, conforme proposto nos trabalhos de Paraschivoiu (2002). Esses modelos foram baseados na teoria do elemento de pá acoplada à teoria do disco atuador. A modelagem matemática dessas teorias apresentava limitações que dificultavam a representação de alguns fenômenos fluidodinâmicos sobre as turbinas. Sobretudo, prever a interação das pás com a esteira formada pelo descolamento do escoamento e contemplar os efeitos do estol dinâmico nas pás.

As metodologias baseadas na Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) mostraram-se ferramentas funcionais e eficientes para contornar as limitações apresentadas pelos modelos analíticos. Com eles, pôde-se representar com acurácia a análise das forças aerodinâmicas sobre as pás das turbinas de forma instantânea e a predição do fluxo de escoamento sobre rotores verticais.

Howell *et al.* (2010) realizaram simulações numéricas e computacionais 2D e 3D. As simulações tridimensionais mostraram boa acurácia e convergência em relação aos resultados experimentais. Do outro lado, os

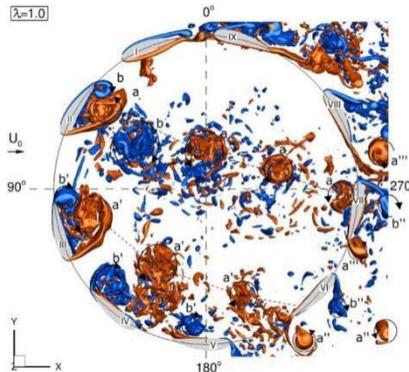
resultados bidimensionais apresentaram-se superestimados em relação aos tridimensionais, o que justifica-se pela incapacidade de modelos 2D em prever e representar com confiabilidade os efeitos de vórtices de ponta, puramente tridimensionais, conforme mostra a Figura 2.

Figura 2 - Vórtices de ponta tridimensionais formados nas pás de turbinas de eixo vertical



Fonte: Howell et al. (2010).

Figura 3 - Condição de estol dinâmico sob baixa velocidade de rotação



Ouro; Stoesser (2017).

Castelli, Englaro e Benini (2011) simularam pelo método dos volumes finitos uma turbina de eixo vertical de três pás retas. O trabalho mostrou que a turbina experimenta uma redução do ângulo de ataque relativo das pás à medida que se aumenta o valor da razão de velocidade de ponta. Isso ocorreu pelo aumento da velocidade tangencial próximo às pás.

Ferrer e Willden (2015) destacam que as pás das turbinas ao passarem pela região *upwind* em seu movimento rotativo promovem a formação de uma esteira composta por estruturas turbilhonares contra rotativas que são transportadas por convecção à jusante da turbina. As pás continuam seu movimento e a depender do tempo relativo entre a convecção da esteira e a rotação das pás pode ocorrer uma interação entre o fluido da esteira e a estrutura da pá na região *downwind* da turbina.

Analisando os campos de vorticidade sobre uma turbina de eixo vertical usando o método da fronteira imersa, Ouro e Stoesser (2017) concluíram que a formação e o transporte das grandes estruturas turbilhonares dependem da velocidade rotacional da turbina. Para baixas velocidades rotacionais, sob a condição de estol dinâmico, uma massiva separação de fluido é evidenciada com a formação de estruturas turbilhonares com comprimento característico da mesma ordem de grandeza da corda da pá. Isso ocorre predominantemente no bordo de ataque das pás, evidenciada pela Figura 3.

Conclusões

O presente trabalho se propôs a apresentar uma breve revisão bibliográfica e estado da arte sobre aerodinâmica em turbinas eólicas de eixo vertical. Mostra, com isso, os principais fenômenos fluidodinâmicos, as variáveis de projeto e os modelos para predição do desempenho dessas máquinas.

Agradecimentos

Os autores agradecem a FURNAS Centrais Elétricas e ao “Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico” (P&D) da ANEEL pelo apoio financeiro.

Referências

CASTELLI, M.; ENGLARO, A.; BENINI, E. The Darrieus wind turbine: proposal for a new performance prediction model based on CFD. *Energy*, v. 36, n. 8, p. 4919-4934, Aug. 2011.

FERRER, E.; WILLDEN, R. Blade–wake interactions in cross-flow turbines. *International Journal of Marine Energy*, v. 11, p. 71-83, Sept. 2015.

GIPE, P. Photos Of Vertical Axis Wind Turbines by Paul Gipe. *Wind-Works*. Disponível em: <http://www.wind-works.org/cms/index.php?id=219>. Acesso em: 21 nov. 2021.

HOWELL, R.; QIN, N.; EDWARDS, J.; DURRANI, N. Wind tunnel and numerical study of a small vertical axis wind turbine. *Renewable Energy*, v. 35, n. 2, p. 412-422, Feb. 2010.

OURO, P.; STOESSERT, T. An immersed boundary-based large-eddy simulation approach to predict the performance of vertical axis tidal turbines. *Computers & Fluids*, v. 152, p. 74-87, Jul. 2017.

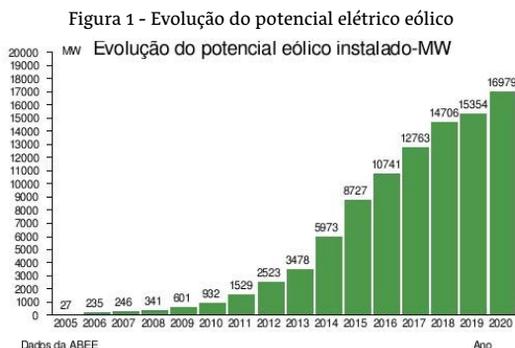
PARASCHIVOIU, I. *Wind Turbine Design: With Emphasis on Darrieus Concept*. Montréal: Polytechnic International Press, 2002.

RESOLUÇÃO DA EQUAÇÃO DE BURGERS UTILIZANDO CÓDIGO EM FORTRAN

Brunno Ricardo Menezes Neves,¹ Andreia Aoyagui Nascimento,²
Aristeu da Silva Neto³

Introdução

A primeira turbina de energia eólica no Brasil foi instalada em Fernando de Noronha, PE, em 1992. Posteriormente, entrou em operação a primeira usina eólica conectada ao sistema elétrico integrado do país, em Gouveia, MG. Mesmo com estas instalações, a capacidade do Brasil no ramo eólico só se tornou expressiva em 2005, quando alcançou 27 MW instalados.



Fonte: ABEEólica (2021).

- 1 Universidade Federal de Goiás – brunno ricardon@discente.ufg.br.
- 2 Universidade Federal de Goiás – aanascimento@ufg.br.
- 3 Universidade Federal de Uberlândia – aristeus@ufu.br.

As turbinas eólicas são equipamentos aerodinâmicos que utilizam da força do vento para gerar energia a partir do movimento do vento contra suas pás. As turbinas eólicas são classificadas quanto à sua forma construtiva:

- Turbinas eólicas de eixo horizontal (TEEH);
- Turbinas eólicas de eixo vertical (TEEV);

Figura 2 - Tipos de turbinas eólicas



Fonte: Wenzel (2007).

A Figura 2 apresenta dois tipos de turbina: à direita tem-se as turbinas de eixo horizontal, mais comuns e mais conhecidas pela população, e à esquerda tem-se as turbinas de eixo vertical. As TEEH são objeto de estudo na mecânica dos fluidos por terem influência direta do ar em suas pás e análises complexas na instalação de várias unidades. Os projetos de turbinas eólicas são complexos e demandam estudos utilizando metodologias que envolvem a mecânica dos fluidos computacional (CFD) e resoluções da equação de Burgers.

Faria (2018) discorre em seu trabalho a importância da geração de energia renovável por meio de matrizes eólicas e promove um estudo e análise de escoamentos sobre aerofólios. Em seu trabalho, é resolvido a equação de burgers e utilizada uma metodologia de mecânica dos fluidos computacional para resolução do problema.

Coutinho (2017) também utiliza de uma metodologia CFD acoplada a outra metodologia para determinar o desempenho de uma turbina eólica horizontal e comparar os resultados com resultados experimentais da literatura.

Nascimento *et al.* (2014), em seu artigo, descreve a equação de Burgers (1948) e propõe uma solução para esta por meio de diversas metodologias, como o método espectral de Fourier e o método de elementos finitos.

Santos *et al.* (2007) propõe uma solução para a equação de Burgers por meio de diversas metodologias, como o método espectral de Fourier.

Este trabalho irá aplicar o método de elementos finitos às equações de Burgers descritas e avaliar os resultados.

Metodologia

A equação de Burgers é uma equação proposta por Burgers (1948) como uma simplificação provinda das equações de Navier-Stokes. Nela, são retidos os efeitos não lineares advectivos assim como os efeitos viscosos difusivos. Seus estudos desenvolveram um modelo matemático utilizado para investigar vários aspectos de turbulência. Burgers (1948) realizou análises de sistemas de equações não-lineares, deduzindo uma Equação Diferencial Parcial (EDP) como um modelo para análise de turbulência, perfis de velocidade e pressão. A EDP de Burgers é descrita por:

$$\frac{\delta u}{\delta t} + u \frac{\delta u}{\delta x} = \nu \frac{\delta^2 u}{\delta x^2} \quad \text{na qual } \Omega \quad \forall t > 0 \quad (1)$$

A solução analítica da equação de Burgers, apresentada por Canuto (1988), é descrita pelas equações (2) a (4):

$$u(x, 0) = c + u_b(x, 0) \quad (2)$$

$$u_b(x, t) = -2\nu \frac{\frac{\delta \Phi}{\delta x}(x-ct, t+1)}{\Phi(x-ct, t+1)} \quad (3)$$

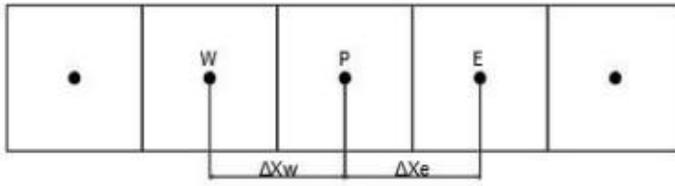
$$\Phi(x, t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{\frac{-[x-(2n+1)\pi]^2}{4\nu}} \quad (4)$$

nas quais “c” é a velocidade de fase, “x” é a posição do eixo das abcissas, “t” é o tempo e “n” o contador do somatório. Santos *et al.* (2007) utiliza a forma geral da equação descrita no livro de Canuto (2006), utilizando o trabalho de Hopf (1950) e Cole (1951), no qual se tem uma variância da equação (3), sendo definida por:

$$\Phi(x, t) = \frac{1}{\sqrt{4\pi vt}} \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{-\frac{[x-(2n+1)\pi]^2}{4vt}} \quad (4)$$

A equação 4 é distinta da equação 1.3. Ambas as equações foram resolvidas por meio da implementação de um código na linguagem Fortran, utilizando a metodologia dos métodos dos elementos finitos. Esse método utiliza a subdivisão do domínio em um número finito de pequenos volumes de controle que correspondem a células definidas, conforme Figura 3.

Figura 3 - Esquema do domínio do método dos elementos finitos



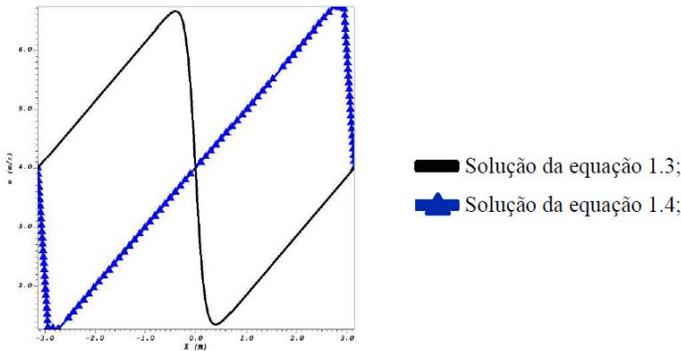
Fonte: Elaboração própria.

São utilizadas integrações ao redor do volume principal para determinar as propriedades necessárias. Este método será aplicado nas equações (1) a (4).

Resultados e discussão

A equação de Burgers foi resolvida para as condições iniciais e implementada utilizando a linguagem Fortran, com um compilador chamado Code Blocks. Após esta resolução, será implementada a condição para $t=\pi/8$.

Figura 4 - Comparação das soluções



Fonte: Elaboração própria.

A simulação foi realizada para uma malha de 32 e 64 volumes, considerando a velocidade de advecção $c=4,0$ m/s e a viscosidade cinemática $0,2$ m²/s. A condição inicial para a equação (2) foi resolvida em duas etapas, considerando a utilização da equação (3) e posteriormente a equação (4).

Conclusões

Ambas as soluções foram realizadas no mesmo computador e demandaram tempos semelhantes para o processamento. Os resultados, porém, divergiram.

Apesar das soluções atingirem valores semelhantes em módulo, estas possuem fases divergentes.

Referências

BOLETIM ANUAL DE DADOS. *ABEEólica*. São Paulo, 30 jun. 2021. Disponível em: <http://abeeolica.org.br/>. Acesso em: 16 nov. 2021.

CANUTO, C. *et al.* *Spectral Methods: Fundamentals in Single Domain*. Berlin: Springer-Verlag, 2006.

COUTINHO, F. R. *Metodologia Híbrida CFD/BEM para a Estimativa do Desempenho de Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal*. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

FARIA, G. S. *Simulação Computacional de Escoamentos Bidimensionais sobre Turbinas Eólicas de Eixo Vertical*. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2018.

NASCIMENTO, A. A. *et al.* A comparison of Fourier pseudospectral method and finite volume method used to solve Burgers equation, *The Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v. 36, n. 4, p. 737-742, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40430-013-0124-9>.

SANTOS, A. L. A. *et al.* Resolução da equação de Burgers utilizando a metodologia pseudoespectral de Fourier. In: CONGRESSO DE MATEMÁTICA APLICADA E COMPUTACIONAL, 33., 2011, Uberlândia. *Anais [...]*. Uberlândia: Universidad Federal de Uberlândia, 2007, p. 387-389.

WENZEL, G. M. *Projeto Aerodinâmico de Pás de Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal*, 2007. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, 2007.

ESTUDO EXPERIMENTAL DO LEIAUTE DE DISPOSIÇÃO DOS MATERIAIS DE ABSORÇÃO SONORA EM UMA SALA

Leandro Neves,¹ Marlipe Garcia²

Introdução

Por se tratar de um elemento invisível, o som muitas vezes é negligenciado no desenvolvimento de projetos de engenharia e arquitetura. Desta forma, problemas acústicos são comuns em ambientes fechados. A acústica de salas é o estudo do som no interior do ambiente, não se preocupando com a transmissão do som para os ambientes adjacentes. Ao aprofundarmos o estudo nessa área, levantamos a hipótese de quanto a disposição dos materiais de absorção sonora influencia nas características acústicas de um leiaute.

As salas de aula têm como função a promoção da aprendizagem, a qual é principalmente conseguida através da comunicação oral e da audição. Assim, uma das principais propriedades físicas que determinam o sucesso desta função é a acústica das salas de aula. Em situações de ensino, a inteligibilidade da fala é o parâmetro mais relevante. Este parâmetro é melhorado eliminando o ruído e reduzindo a reverberação.

Uma tática para diminuir a reverberação de uma sala é fazer o amortecimento utilizando materiais absorventes, como cadeiras acolchoadas,

1 Universidade Federal de Goiás – leandroneves@discente.ufg.br.

2 Universidade Federal de Goiás – marlipe@ufg.br.

cortinas, carpete ou painéis dedicados para absorção de som. Além disso, a presença de pessoas em uma sala reduz a reverberação e, portanto, produz um valor de tempo de reverberação menor em comparação com a sala desocupada.

Existem estudos sobre a influência da quantidade e da localização do material de absorção sonora em acústica de salas. Mir e Abdou (2005) investigaram o tempo de reverberação para a área de absorção sonora em um forro absorvente em formato de “U”, completado por uma superfície refletora em seu interior e parte das paredes com absorção sonora. Este trabalho concluiu no geral, a melhor configuração de colocação de material de absorção sonora e também as características de tratamento de superfície, em uma tentativa de melhorar as condições de audição em salas de aula inteligentes. Bistafa e Bradley (2000) estudaram diferentes tratamentos acústicos variando a quantidade de material de absorção sonora e a eficiência de materiais de absorção de som, testando a mesma quantidade de material em configurações diferentes. Eles também compararam os resultados com expressões analíticas, entre elas Sabine, Eyring, Fritzy e Arau-Puchades. No entanto, destaca-se Fritzy (1959 *apud* Brandão, 2016), que propôs um equacionamento que também pondera a distribuição dos dispositivos de absorção sonora.

As simulações que são feitas durante o desenvolvimento de um estudo, além de possuírem um custo considerável, muitas vezes não condizem com a resposta real, pois apesar de possuírem bons modelos os dados de entrada geralmente não são tão confiáveis. As predições do tempo de reverberação e das métricas de inteligibilidade de discurso por programas de simulação, como Odeon, nem sempre são mais precisas quando comparada aos cálculos analíticos (Bistafa *et al.*, 2000; Bistafa *et al.*, 2001).

Sabendo disso, este trabalho tem como objetivo geral investigar experimentalmente a influência e modelagem da posição de materiais de absorção sonora na característica acústica de salas de aula.

Metodologia

O estudo experimental deste trabalho consiste no método para medição dos parâmetros acústicos de um ambiente fechado e deve ser norteado pela NBR 3382:2017, que versa sobre a medição de parâmetros de acústica de salas. Ela descreve número de medições, número de posições de microfone e fonte sonora, bem como incertezas relacionadas ao método de medição. Ainda são apresentadas duas formas de excitação da sala, método da resposta impulsiva e método do ruído interrompido.

Por sua vez, o experimento para avaliar a disposição dos materiais de absorção sonora deve ser conduzido pelos métodos de superfície de resposta (Montgomery, 2012) e redes neurais (Badan, 2015), comparando os resultados com as aferições feitas em um medidor de pressão sonora.

Por fim, a análise dos resultados deve ser baseada na técnica de análise de variância (Montgomery, 2012), a qual permite, estatisticamente, inferir se dois ou mais tipos de leiautes realmente apresentam diferença significativas.

Resultados e discussão

Para este trabalho foi realizado o estudo do campo sonoro em ambientes fechados e dos aspectos físicos fundamentais de acústica de salas, bem como uma revisão bibliográfica sistemática de trabalhos sobre disposição de materiais de absorção sonora em ambientes fechados.

Foi verificado que há pouca investigação sobre essa temática, indicando que o objetivo proposto é válido e merece um estudo mais aprofundado. Como sugestão do Prof. Dr. Eric Brandão, limitamos o tipo de sala para salas de aula, tornando a pesquisa mais direcionada.

Por fim, será feita a medição dos parâmetros objetivos na sala do Lab-MEC - EMC/UFG e utilizando da metodologia proposta apresentaremos os resultados como dissertação de mestrado.

Conclusões

Ao fim do trabalho será possível obter uma bibliografia sobre a utilização das metodologias de superfície de resposta e redes neurais em acústica de salas, além de compreender a formação do campo sonoro em um ambiente fechado, bem como os fatores que o influenciam; entender os parâmetros acústicos que caracterizam um ambiente fechado, expondo outros além do tempo de reverberação; medir os parâmetros acústicos de um ambiente fechado para vários leiautes de materiais de absorção sonora; analisar a influência do leiaute dos materiais de absorção sonora nos parâmetros acústicos e, por fim, sugerir o melhor leiaute que adequa acusticamente o ambiente utilizando a menor quantidade de material de absorção sonora.

Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Acústica – Medição de parâmetros de acústica de salas*: ABNT NBR 3382, Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
- BADAN, M. A. B. C. *Microfone virtual com base no sinal vibro acústico da fonte emissora*. 2015. 121f. Dissertação (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, 2015.
- BISTAFA, S. R.; BRADLEY, J. S. Predicting reverberation times in a simulated classroom. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 108, n. 4, p. 1721-1731, 2000.
- BISTAFA, S. R.; BRADLEY, J. S. Predicting speech metrics in a simulated classroom with varied sound absorption. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 109, p. 1474-1482, 2001.
- BRANDÃO, E. *Acústica de Salas: Projeto e modelagem*. São Paulo: Edgard Blucher, 2016.
- MIR, S. H.; ABDU, A. A. Investigation of sound-absorbing material configuration of a smart classroom utilizing computer modeling. *Building Acoustics*, v. 12, n. 3, p. 175-188, 2005.
- MONTGOMERY, D. C. *Design and Analysis of Experiments*. 8 ed. Nova Iorque: John Wiley & Sons, 2012.

ANÁLISE NUMÉRICA E FÍSICA DA CONDUÇÃO BIDIMENSIONAL PERMANENTE DE ENERGIA TÉRMICA EM UMA PLACA PLANA

Thiago Fernando Santiago de Freitas,¹ Elie Luis Martínez Padilla²

Introdução

A simulação numérico-computacional é uma das alternativas para respostas a problemas de engenharia (Maliska, 2004; Patankar, 1980). Para uma resposta confiável, precisa e com acurácia necessita-se de métodos numéricos eficientes, uma malha numérica capaz de modelar o fenômeno físico, e tolerâncias numéricas adequadas ao problema físico.

Com uma confiável resposta computacional é possível analisar o fenômeno físico modelado. No presente trabalho busca-se: comparar os métodos de Jacobi, Gauss-Seidel, Sobre-Relaxações Sucessivas (SOR), Algoritmo de Thomas (TDMA) e determinar o mais eficiente dentre eles; analisar a influência de tolerâncias numéricas na solução computacional-numérica; e realizar uma análise sobre a influência do termo fonte no campo de temperatura computacional-numérica obtido.

Hasnat *et al.* (2015) também modelaram uma placa plana sob condução de energia térmica em regime permanente com condições de Dirichlet através dos Métodos dos Volumes Finitos (MVF) e TDMA. Os resultados, quando comparados com a solução Analítica, provaram que a simulação

¹ Universidade Federal de Uberlândia (UFU) – thiago.santiago@ufu.br.

² Universidade Federal de Uberlândia (UFU) – epadilla@ufu.br.

numérica estava em concordância com os resultados analíticos, indicando a boa eficiência dos métodos utilizados.

Metodologia

Uma placa plana com propriedades constantes e dimensões iguais a $3H \times 3H$ m com condições de Dirichlet impostas e termo de conversão de alguma forma de energia em energia térmica é modelada computacionalmente no presente trabalho através de um código FORTRAN de própria autoria. Para uma análise abrangente, toda a modelagem do problema físico foi realizada com a equação da condução de energia térmica adimensional em função dos parâmetros adimensionais: X^* e Y^* , comprimentos adimensionais, e θ , temperatura adimensional.

As condições de contorno foram obtidas através da solução analítica para um termo de conversão energética, F , nulo: $\theta = x + y + xy$.

Para a discretização da equação de calor foi utilizado o Método dos Volumes Finitos (MVF) com 2 volumes discretizantes. A solução numérica é então obtida através da resolução de um sistema linear formado a partir da aplicação da equação de condução discretizada em uma malha numérica de 12×12 volumes finitos.

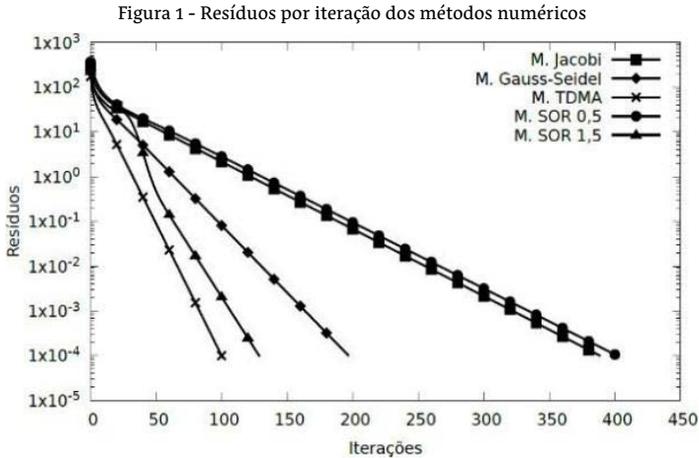
Foram usados quatro métodos numéricos para a solução do sistema linear, a fim de determinar qual apresenta melhor eficiência. Os métodos analisados foram: Método de Jacobi, Método de Gauss-Seidel, Método de Sobre-Relaxações Sucessivas (SOR) com coeficientes de 0,5 e 1,5, e o Método da Matriz Diagonal (TDMA) ou Algoritmo de Thomas.

Todos os métodos implementados são iterativos e doravante necessitam de um critério de parada. Assumiu-se como critério o resíduo numérico da solução numérica atingir uma tolerância numérica em que foram implementadas três valores de tolerância, 10^{-2} , 10^{-4} e 10^{-6} .

O termo referente a conversão de alguma forma de energia em energia térmica, F , foi implementado com valores de: 0, 10, 50 e 100 para análise do impacto na distribuição de θ .

Resultados e discussão

A Figura 1 apresenta os resíduos por iterações dos métodos numéricos implementados por número de iterações em uma malha com $F = 0$ e tolerância numérica igual a 10^{-4} , onde observa-se que o TDMA é o método mais eficiente dentre os implementados, *i. e.*, atinge a tolerância numérica imposta com menor quantidade de iterações.



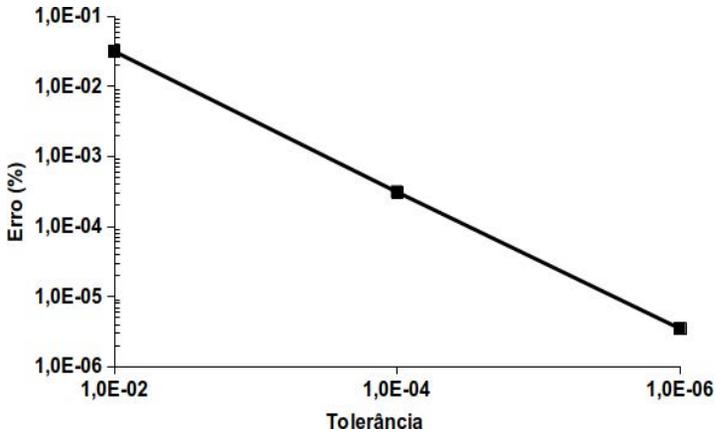
Fonte: Elaboração própria.

A comparação das tolerâncias implementadas em relação ao erro máximo, obtido a partir da comparação entre a solução analítica e numérica com malha de 12×12 volumes, $F = 0$ e implementação com TDMA é apresentada na Figura 2. Os resultados indicam que a ordem de grandeza dos erros máximos é sempre a mesma da tolerância numérica imposta.

A Figura 3 apresenta o perfil de θ para os diferentes F impostos em $x^* = 1,5$ onde observa-se uma tendência de formação de perfis parabólicos de temperatura adimensional com valores máximos maiores à medida que F também aumenta.

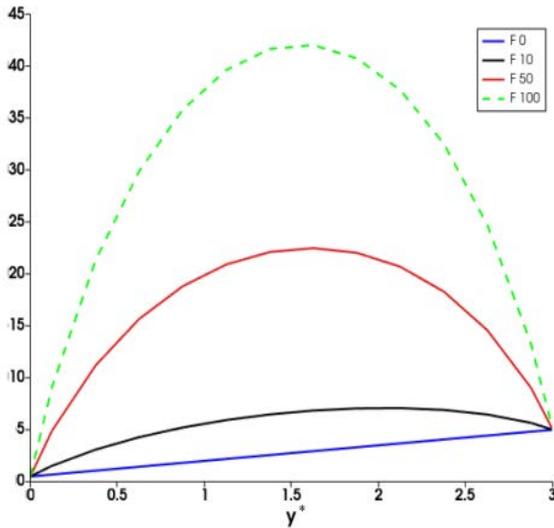
Destaca-se que os custos computacionais de todas as simulações realizadas foram inferiores a 1 S para uma máquina com processador Intel Core i5 da sétima geração com memória RAM de 2.5 GHz

Figura 2 - Tolerância numérica por erro máximo



Fonte: Elaboração própria.

Figura 3 - Perfis de θ para diferentes F em $x^* = 1,5$



Fonte: Elaboração própria.

Conclusões

Através do presente trabalho conclui-se que:

- O método TDMA apresenta maior eficiência dentre os outros métodos implementados;
- A tolerância numérica determina a ordem de grandeza dos erros máximos da modelagem realizada;
- O termo de conversão de alguma forma de energia em energia térmica torna os perfis de θ cada vez mais não lineares à medida que se distanciam de 0.

Agradecimentos

Os autores agradecem a FURNAS Centrais Elétricas e ao “Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico” (P&D) da ANEEL pelo apoio financeiro.

Referências

MALISKA, C. R. *Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional*. Rio de Janeiro: LTC, 2004.

PATANKAR, S. V. *Numerical Heat transfer and Fluid Flow*. Boca Raton: CRC Press, 1980.

HASNAT, M.; KAID, N.; BENSAFI, M.; BELKACEM, A. A Numerical Technique Finite Volume Method for Solving Diffusion 2D Problem. *International Journal of Engineering and Science*, v. 4, n. 1, p. 35-41, 2015.

EFEITO DOS PARÂMETROS DE USINAGEM NA USINABILIDADE DOS AÇOS INOXIDÁVEIS 410D E 420A FERRÍTICO E MARTENSÍTICO NO PROCESSO DE ELETOEROSÃO

João Bosco da Cunha,¹ Amanda Kozlowski de Moraes,²

Daniel Fernandes da Cunha,³ Rhander Vianna⁴

Introdução

Os aços inoxidáveis são empregados na indústria devido à sua alta resistência à corrosão e a suas boas propriedades mecânicas (Zaffora *et al.*, 2021). Os aços inoxidáveis 316L, aço liga 422 são empregados também como material estrutural nas indústrias de petróleo e gás, refinarias, produtos químicos, petroquímicos. No entanto, há uma baixa resistência ao desgaste do aço em aplicações prolongadas (Majumdar *et al.*, 2009).

A proposta inclui o emprego do processo de EDM (eletroerosão) para a usinagem do material selecionado. Este processo baseia-se no rápido aquecimento local da superfície, promovido pela descarga elétrica e em seguida, pelo seu rápido resfriamento (D'Oliveira *et al.*, 2002).

1 Universidade Federal de Goiás – jbosco@ufg.br.

2 Universidade Federal de Goiás – kmoraisamanda@discente.ufg.br.

3 Universidade Federal de Goiás – danielcunha@ufg.br.

4 Universidade de Brasília – rhandervianna@gmail.com.

O trabalho foca na usinabilidade de dois tipos de aços inoxidáveis, o 410D e o 420A. Os parâmetros analisados são a corrente elétrica, tempo de arco aberto, frequência do pulso, GAP e o tratamento térmico ao qual foram submetidas as amostras. Como parâmetros analisados encontram-se a taxa de remoção de material (Rajmohan *et al.*, 2012; Faijan; Kumar; Soota, 2020; Singh *et al.*, 2019), a qualidade superficial da superfície usinada, a taxa de desgaste da ferramenta de cobre (Faijan; Kumar; Soota, 2020; Singh *et al.*, 2019) e o overcut (Alshemary *et al.*, 2018).

Devido à variação da dureza das amostras ferríticas e martensíticas, a alteração de parâmetros influenciam na superfície gerada. O trabalho vem mostrar como a variação de parâmetros pode melhorar a qualidade da superfície gerada, e se o tratamento térmico dos aços inoxidáveis influencia no produto final.

O objetivo é desenvolver o estudo de tecnologias na usinabilidade de aços inoxidáveis pelo processo de eletroerosão por penetração (EDM).

Metodologia

As amostras de aço inoxidável foram fornecidas pela empresa Aperam. Além disso, serão utilizadas a máquina de EDM por penetração, modelo ONC 400 Orbital; o forno de tratamento térmico JUNG, modelo 3010; e a retífica plana, modelo RPA - 800, todas presentes no laboratório da UFG.

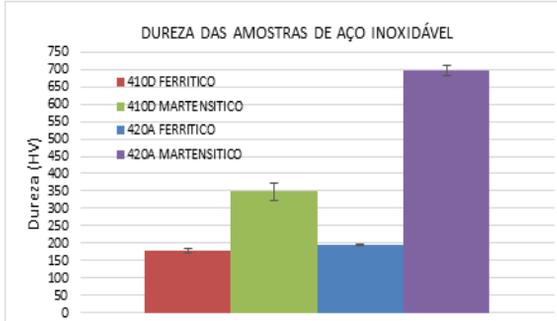
Diferentes parâmetros de usinagem de EDM serão utilizados para usinagem dos aços inoxidáveis. A superfície será analisada por meio de microscopia ótica. A qualidade da superfície usinada será avaliado com um rugosímetro SJ-201 da Mitutoyo. A dureza obtida pelos tratamentos térmicos será medida por um durômetro Vickers.

Resultados e discussão

Juntamente com Morais (2021), foi feito um estudo do efeito da corrente elétrica utilizada no processo EDM, na usinabilidade dos aços inoxidáveis ferrítico e martensítico, onde foi analisado: a taxa de remoção de material, taxa de desgaste do eletrodo, sobre corte e a rugosidade da área usinada.

Após o tratamento térmico, com aquecimento gradual no forno até 1050 °C, aquecido por trinta minutos, e resfriado por convecção forçada, obteve-se um aumento na dureza do aço 410D de 95% e do aço 420A de 250%, conforme demonstrado na Figura 1.

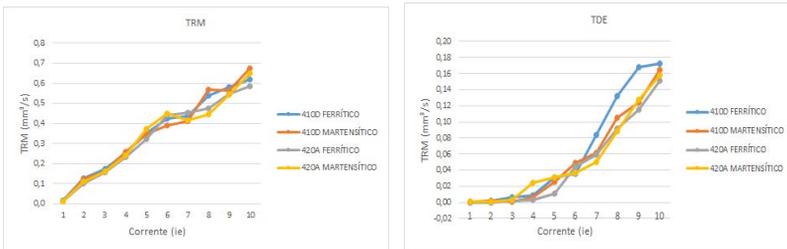
Figura 1 - Comparação do aumento da dureza após tratamento térmico



Fonte: Elaboração própria.

Foi possível verificar que com o aumento da intensidade da corrente há o aumento das taxas, tanto de remoção de material como também de desgaste do eletrodo de forma linear, conforme figura 2.

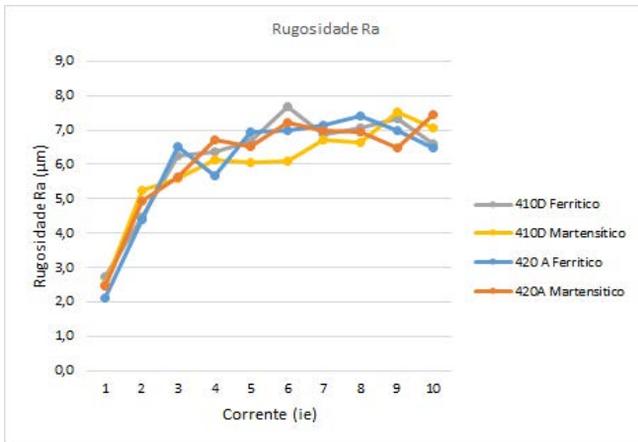
Figura 2 - Taxa de remoção de material (TRM) e Taxa desgaste eletrodo (TRE)



Fonte: Elaboração própria.

Também foi comprovado por este trabalho que a corrente é realmente um parâmetro de grande influência na rugosidade superficial, sendo que quanto maior a intensidade da corrente aplicada, maior é a rugosidade da superfície trabalhada, afetando o acabamento superficial, conforme Figura 3.

Figura 3 - Comparação das rugosidades superficiais Ra



Fonte: Elaboração própria.

Conclusões

O trabalho é exploratório com o objetivo de confirmar se o processo de EDM deve ser executado antes ou após o processo de tempera. Tal definição visa reduzir custos com ferramentas e aceleração do processo de EDM envolvendo os aços foco da pesquisa.

Referências

- ALSHEMARRY, A. *et al.* Accuracy of duplex stainless steel feature generated by electrical discharge machining (EDM). *Measurement*, v. 130, p. 137-144, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.08.013>.
- D'OLIVEIRA, A. S. C. *et al.* Microstructural features of consecutive layers of Steellite 6 deposited by laser cladding. *Surface and Coatings Technology*, v. 153, n. 1-2, p. 203-209, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(01\)01687-5](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(01)01687-5).
- FAIJAN, K.; KUMAR, J.; SOOTA, T. Optimizations of EDM process parameters for stainless steel D3. *Materials Today: Proceedings*, v. 25, p. 635-638, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.529>.

MAJUMDAR, J. D. *et al.* Direct Laser Cladding of SiC dispersed AISI 316L stainless steel. *Tribology International*, v. 42, n. 5, p. 750-753, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2008.10.016>.

RAJMOHAN, T. *et al.* Optimization of Machining Parameters in Electrical Discharge Machining (EDM) of 304 Stainless Steel. *Procedia Engineering*, v. 38, p. 1030-1036, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.06.129>.

SINGH, G. *et al.* Machining performance and influence of process parameters on stainless steel 316L using die-sinker EDM with Cu tools. *Materials Today: Proceedings*, v. 18, p. 2468-2476, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.096>.

ZAFFORA, A. *et al.* Corrosion of stainless steel in food and pharmaceutical industry. *Current Opinion in Electrochemistry*, v. 29, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coelec.2021.100760>.

ANÁLISE DE TOLERÂNCIA DIMENSIONAL E RESISTÊNCIA MECÂNICA EM ROSCAS FABRICADAS PELO PROCESSO DE FDM EM PLA

Thiago Menezes do Prado,¹ Daniel Fernandes da Cunha,² Rhander Viana,³ Marcus
Vinicius Galdino da Silva⁴

Introdução

Esta pesquisa dá ênfase sobre uma tecnologia denominada FDM (modelagem por deposição de material fundido). Especificamente neste trabalho, utilizaremos o poliácido láctico, também conhecido como PLA, PDLA ou PLAA, um polímero sintético termoplástico que vem substituindo os plásticos convencionais em diversas aplicações. Ele é feito com ácido láctico (composto orgânico de função mista – ácido carboxílico e álcool) a partir de fontes renováveis como milho, mandioca, beterraba, e, por conta disso, é biodegradável, compostável e reciclável, não possuindo nenhum tipo de resíduo tóxico, como apresentado por Hunt *et al.* (2015) no trabalho com foco em códigos de reciclagem, e por Franchetti e Marconato (2006), no trabalho com foco em redução de resíduos plásticos.

1 Universidade Federal de Uberlândia – thiago_menezes20@hotmail.com.

2 Universidade Federal de Goiás – danielcunha@ufg.br.

3 Universidade de Brasília – rhanderviana@gmail.com.

4 SENAI Uberlândia Santa Rosa CFP Dr. Celso Charuri – marcus-galdino@hotmail.com.

Foi utilizada para a fabricação de peças teste a impressora 3D do fabricante Creality, modelo ENDER 3V2. Cada corpo de prova foi elaborado a partir de um modelo de parafuso em formato Solidworks. No *software* Autodesk Inventor foi desenhado um cubo, e deste cubo foi subtraído o volume do modelo do parafuso importado. Os corpos de prova são blocos de PLA de medidas 40 mm x 40 mm com furos roscados passantes com as determinadas medidas: M12 x 1,25, M12 x 1,5, e M 12x 1,75. A qualidade das roscas internas foram avaliadas de forma visual, e em seguida testados as tolerâncias a partir de um parafuso convencional de aço carbono adquirido em lojas comuns. Inicialmente foram observados ajustes sobre as tolerâncias com relação à fabricação dos corpos de prova, portanto, até que os ajustes fossem identificados e resolvidos, foram fabricados apenas corpos de prova da rosca de modelo M12 x 1,75.

O objetivo do trabalho é estudar a tolerância geométrica dos filetes de roscas e sua resistência à tração.

Metodologia

Primeiro teste feito com duas amostras (Figura 1), com furos roscados feitos na horizontal e vertical. Foram utilizados os seguintes parâmetros de impressão: Altura da camada igual 0,25 mm, espessura da parede de 3 camadas e a velocidade de deposição 50 mm/min.

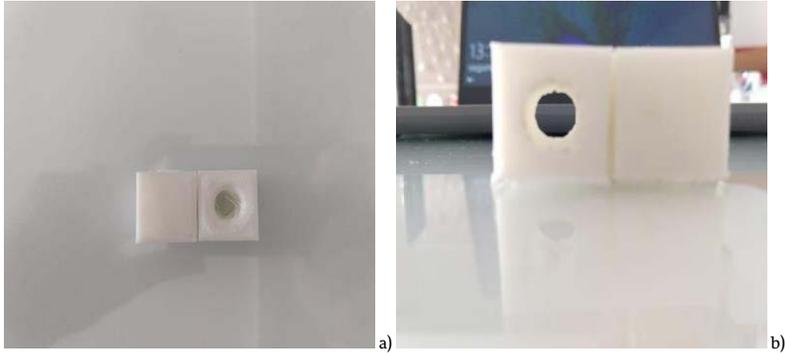
Figura 1 - Corpos de prova feitos com furo na horizontal e vertical



Fonte: Elaboração própria.

Observa-se que a resolução da peça (furo e rosca) na vertical ficou inferior à horizontal, como apresentado na Figura 2 a). A peça fabricada na horizontal ficou com uma resolução melhor, porém com pequeno erro de circularidade, como apresentado na figura 2 b).

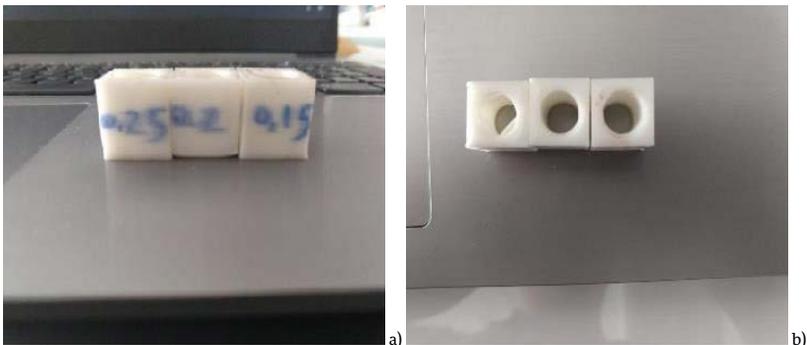
Figura 2 - Comparação entre os furos fabricados na vertical (a) e na horizontal (b)



Fonte: Elaboração própria.

Sendo assim, foi realizado novamente o mesmo processo alterando a altura da camada, utilizando assim 0,25 mm (para fator de comparação), 0,20 mm e 0,15 mm. Foi observado que quanto menor a altura da camada mantendo o restante do processo inalterado, melhor a resolução e a qualidade da peça, como exposto na figura 3 a) e b).

Figura 3 - Vista lateral (a) e superior (b) dos corpos de prova fabricados com altura da camada de 0,25, 0,2 e 0,15mm, respectivamente, da esquerda para a direita



Fonte: Elaboração própria.

Resultados e discussão

Após definida uma configuração aceitável para a qualidade da peça e principalmente da rosca, foi analisada a tolerância da rosca. Para isso, foi exportado pelo inventor (SolidWorks) um parafuso padrão M12 x 1,75 e criado um cubo para subtração do volume, criando, assim, um cubo roscaado padrão.

Depois de fabricado esse bloco roscaado e utilizando um parafuso convencional de aço para teste, analisou-se que a fabricação não pode ser feita com as medidas ideais da rosca do parafuso. Sendo assim, foram feitos outros blocos com furos e roscas, mas imprimindo-as com folgas laterais em cada filete de rosca.

As folgas foram definidas no raio da seguinte forma: em 0,5 mm o parafuso entrou mas ficou com muita folga, com 0,4 mm também não obtivemos êxito, 0,3 mm melhorou a folga, resultando em uma interferência melhor, 0,2 mm a interferência e tolerância foi a mais próxima do ideal, o parafuso foi rosqueado por todo seu comprimento com interferência, mas livre, sem indícios de folga aparente e 0,1 mm o parafuso foi rosqueado mas com uma interferência muito grande e dificultando o rosqueamento a cada filete de rosca. Os cubos testes foram fabricados com as medidas 15 x 15 mm apenas pela economia de tempo de fabricação e redução de material gasto. As peças fabricadas com essas tolerâncias são expostas na Figura 4.

Figura 4 - Amostras fabricadas com folgas entre modelo de parafuso e roscas



Fonte: Elaboração própria.

Para obter as provas dos parâmetros, foram fabricados 4 cubos roscados bipartidos com folgas de 0,5 mm, 0,4 mm, 0,3 mm e 0,2 mm, na horizontal e vertical, para análise de resolução da rosca, sendo que estas serão levadas ao microscópio para análise e validação da metodologia de folga/interferência das mesmas.

Conclusões

Depois desses ensaios e testes, variação de parâmetros para deposição dos cubos roscados, observou-se que para uma fabricação das peças mais próximas do ideal deve-se utilizar uma altura da camada menor (0,15 mm), com essa resolução foi ajustada a folga/interferência da rosca de 0,2 mm no raio para que cada filete de rosca fosse fabricado na horizontal com 3 camadas. Partindo desse princípio, pode-se iniciar os primeiros testes com uma precisão geométrica dos filetes de roscas melhor e, conseqüentemente, resultados mais exatos nos ensaios de tração que verificará a resistência mecânica desses filetes.

Referências

HUNT, E. J.; ZHANG, C.; ANZALONE, N.; PEARCE, J. M. Polymer recycling codes for distributed manufacturing with 3-D printers. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 97, p. 24-30, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.02.004>.

MATHIAS, R. M. *Análise experimental de amostras produzidas por manufatura aditiva em PLA através de ensaio de tração*. 2019. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

FRANCHETTI, S. M. M.; MARCONATO, J. C. Polímeros biodegradáveis: Uma solução parcial para diminuir a quantidade dos resíduos plásticos. *Química Nova*, v. 29, n. 4, p. 811-816, jul. 2006.

TENDÊNCIAS DO TRATAMENTO TÉRMICO EM AÇO INOX MARTENSÍTICO 410 E 420 E SEU EFEITO NAS PROPRIEDADES DO MATERIAL

Renata Rodrigues Alves,¹ Daniel Fernandes,² José Lúcio³

Introdução

Para resistir a ambientes agressivos, os materiais de engenharia devem possuir excelentes propriedades mecânicas. Assim, dentre os aços mais utilizados, destaca-se o aço inoxidável martensítico, devido sua boa propriedade mecânica e moderada resistência à corrosão (Kumar *et al.*, 2017). Mais uma vantagem, de acordo com Pan *et al.* (2019), é que diferentemente de outros aços inoxidáveis, as propriedades do aço martensítico podem ser modificadas com tratamentos térmicos.

A composição química dos aços inoxidáveis martensíticos é o que os diferencia entre si, sendo os aços AISI 410, AISI 420 e AISI 440 os mais utilizados. Em um extenso trabalho realizado por Dalmau *et al.* (2018), concluiu-se que apesar das boas propriedades mecânicas, a resistência à corrosão ainda é um problema, sendo a corrosão por pite a mais reportada.

1 Universidade Federal de Goiás – renata_rodrigues@ufg.br.

2 Universidade Federal de Goiás – danielcunha@ufg.br.

3 Universidade Federal de Goiás – jlucio@ufg.br.

Nesse sentido, este trabalho apresenta os principais artigos publicados desde 2016 com estudos sobre aço inox Martensítico, em especial o AISI 410 e 420, submetido a tratamento térmico. O propósito deste estudo é elencar as descobertas mais relevantes, tendências da comunidade científica quanto ao tema e possíveis lacunas a serem preenchidas.

Metodologia

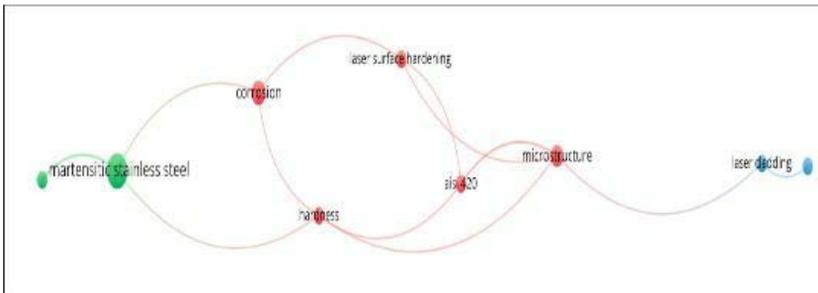
Para a seleção dos trabalhos foram utilizados apenas artigos publicados entre 2016 e 2021 que abordassem tratamento térmico em aços inox 410, 420 e/ou martensítico, com a caracterização do material e sua influência nas propriedades mecânicas. Além disso, apenas publicações em revistas A1 foram selecionadas, resultando em um total de 15 (quinze) artigos.

Após a devida seleção dos artigos, uma correlação entre eles foi realizada utilizando-se, para tanto, o programa VosViewer (Figura 1), onde dados importantes foram extraídos. Por fim, todos os artigos foram lidos na íntegra.

Resultados e discussão

Os 15 (quinze) principais artigos dos últimos 5 (cinco) anos foram lidos na íntegra e discriminados os materiais estudados, o tratamento térmico realizado e os parâmetros analisados. A correlação entre os artigos encontrados foi feita por meio do programa VosViewer (Figura 1), onde dados importantes foram extraídos.

Figura 1 - Palavras com co-ocorrência nos artigos.



Fonte: Elaboração própria.

As palavras destacadas na Figura 1 sugerem que a maioria dos artigos publicados tem uma tendência a estudar os aços AISI 420, predominando técnicas a laser para tratamento na superfície. A aplicação de tratamento de endurecimento superficial se dá pela necessidade de elevada dureza superficial, provavelmente acima das conseguidas com tratamentos térmicos tradicionais (têmpera e revenimento).

A predominante escolha do aço inox 420 em comparação com o 410 se justifica possivelmente pela superioridade que o primeiro tem em relação à dureza, resistência mecânica e similar resistência à corrosão. Isso se dá devido à grande quantidade de carbono, homogeneidade da estrutura e tamanho de grão mais fino que o aço AISI 420 apresenta em relação ao aço AISI 410 (Mabruri *et al.*, 2018).

As propriedades do material mais analisadas são a resistência à corrosão e dureza. Apesar das boas propriedades mecânicas, a resistência à corrosão ainda é um problema para o aço inox martensítico, sendo a corrosão por pite a mais reportada (Dalmau *et al.*, 2018).

A dureza é uma das propriedades mais discutidas entre os autores, sendo de fácil análise a microestrutura. Esta geralmente é analisada em microscópio eletrônico, a fim de analisar as fases das amostras.

Conclusões

O estudo aqui realizado gerou informações importantes sobre tratamento térmico em aço inox Martensítico, em especial 410 e 420, e seu efeito nas propriedades do material, mostrando que tal aço tem sido amplamente utilizado na engenharia devido a suas boas propriedades mecânicas e possibilidade de aprimoramento.

Os resultados indicam uma tendência em tecnologias de tratamento de dureza superficial, com destaque para as técnicas a laser, em aço inox martensítico 420. Estas têm como objetivo aprimorar a dureza e resistência à corrosão. Por fim, o aço inox martensítico possui uma resistência à corrosão que pode ser aprimorada, tornando-se um tema de estudo recorrente.

Referências

DALMAU, A.; RICHARD, C.; IGUAL-MUÑOZ, A. Degradation mechanisms in martensitic stainless steels: Wear, corrosion and tribocorrosion appraisal. *Tribology International*, v. 121, p. 167–179, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.01.036>.

KUMAR, B. S.; KAIN, V.; SINGH, M.; VISHWANADH, B. Influence of hydrogen on mechanical properties and fracture of tempered 13 wt% Cr martensitic stainless steel. *Materials Science & Engineering: A*, v. 700, p. 140-151, 17 July 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.05.086>.

MABRURI, E.; PRIFIHARNI, S.; ANWAR, M. S.; ROMIJARSO, T. B.; ADJANTORO, B.. Mechanical properties optimization of the modified 410 martensitic stainless steel by heat treatment process. *Materials Today: Proceedings*, v. 5, n. 7, p. 14918–14922, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.04.030>.

PAN, L.; KWOK, C. T.; LO, K. H. Enhancement in hardness and corrosion resistance of AISI 420 martensitic stainless steel via friction stir processing. *Surface & Coatings Technology*, v. 357, p. 339-347, 15 January 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.10.023>.

REVISÃO LITERÁRIA SOBRE PLANEJAMENTO AUTOMÁTICO APLICADO A PROCESSOS DE MANUFATURA

Wesley da Silva Alves,¹ João Paulo Silva Fonseca²

Introdução

De acordo com Ghallab *et al.* (2004), o Planejamento Automático é uma subárea da Inteligência Artificial (IA) que estuda os processos de planejamento em um ambiente computacional. O principal objetivo do planejamento é satisfazer, através da execução de ações, objetivos previamente estabelecidos. O planejamento automático investiga como as estratégias adequadas para alcançar um determinado objetivo podem ser derivadas automaticamente (Russell; Norvig, 2009). Basicamente, o objetivo é produzir uma sequência de ações que deverá ser executada por um ou mais agentes. Sendo assim, dado o estado inicial, um conjunto de operadores (ações que transformam o estado do mundo) e um estado final, o objetivo de um algoritmo de planejamento (denominado planejador) é encontrar a sequência de ações (plano) que conduz o agente do estado inicial para o estado final (Cantoni, 2010). As linguagens mais utilizadas na representação clássica são as linguagens STRIPS e PDDL.

Portanto, o presente artigo tem como objetivo realizar uma revisão integrativa da literatura abordando diversas aplicações de planejamento

1 Universidade Federal de Goiás – wesleyalves@discente.ufg.br.

2 Universidade Federal de Goiás – jpsfonseca@ufg.br.

automático de diferentes áreas de conhecimento, soluções, *hardwares* e *softwares*.

A Figura 1 mostra um modelo conceitual de um planejador automático.

Figura 1 - Modelo conceitual de um planejador



Fonte: Ghallab et al. (2004).

Metodologia

Trata-se de um estudo de abordagem qualitativa, do tipo revisão narrativa da literatura. A estratégia de busca se deu nas seguintes bases de dados: Portal da CAPES, Google Acadêmico, *Scopus* (Elsevier Science), *Scientific Electronic Library Online* (SciELO). O acesso ocorreu entre os meses de fevereiro a outubro de 2021. Os descritores utilizados para a busca foram: planejamento automático; automação; manufatura. Foram incluídos estudos teóricos e práticos sobre planejamento automático aplicado à processos de manufatura, escritos em português ou inglês, publicados entre os anos de 2016 e 2021. Na etapa de busca e seleção da literatura científica, foi feita uma busca avançada nas bases de dados mencionadas acima, resultando em 69 artigos: 34 disponíveis no Google Acadêmico; 18, no Portal da CAPES; 11, no Scopus; e 6, no Scielo. Após leitura dos títulos, resumos ou *abstracts* dos textos, foram excluídos 50 artigos que não atendiam aos critérios. O estudo realizado dispensa a avaliação de um Comitê de Ética em pesquisa por se tratar de revisão narrativa.

Resultados e discussão

Após aplicação dos critérios, dezenove artigos foram elegíveis para compor a amostra da presente revisão. Estes foram dispostos em um quadro para síntese, contendo informações como: periódico, autores, ano de publicação, título, tipo de estudo, objetivo, considerações e resultados de interesse. Os estudos incluídos nesta revisão destacam a pesquisa e o desenvolvimento de soluções de automação inteligentes baseadas em técnicas de planejamento e programação de processos integrados automatizados em nível de controle de manufatura discreta.

Neste trabalho, é apresentada uma proposta que será aplicada a um ambiente integrado de modelagem automática aplicado a uma planta didática de Robótica, conforme Figuras 2 e 3.

Figura 2 - Bancada de Robótica em fase de montagem



Fonte: Elaboração própria.

Essa planta simula uma linha de produção em uma fábrica que pode ser constituída por células de produção individuais. Cada célula tem uma função específica no processo (distribuição, análise, processamento, manuseio, montagem, armazenamento).

Figura 3 - Bancada de Robótica em fase de montagem



Fonte: Elaboração própria.

Conclusões

O uso do planejamento automático aplicado a processos de manufatura ganha mais destaque no meio acadêmico devido à possibilidade de contribuir com novos métodos e abordagens para o enfrentamento de aplicações reais na indústria moderna. A partir do que foi abordado, entende-se que o avanço da tecnologia em máquinas, equipamentos e *softwares* tem tornado cada vez mais acirrada a competição. A pesquisa de planejamento tem sido um campo empolgante e em rápida evolução na última década, observando avanços dramáticos no alcance e escopo da tecnologia, tornando este artigo oportuno para o presente momento.

Referências

- CANTONI, L. F. A. *Avaliação do uso da linguagem PDDL no planejamento de missões para robôs aéreos*. 2010. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) – Instituto de Ciências Exatas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.
- GHALLAB, M.; NAU, D. S.; TRAVERSO, P. *Automated Planning: Theory and Practice*. San Francisco, CA: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2004.
- RUSSELL, S.; NORVIG, P. *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. 3. ed. Harlow: Pearson Education Limited, 2009.

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE ESCOAMENTO SOBRE TERRENOS PLANOS PARA A OBTENÇÃO DO POTENCIAL EÓLICO LOCAL

Bruno Leal Santos,¹ Felipe Pamplona Mariano²

Introdução

A primeira etapa em um projeto de instalações eólicas é conhecer o potencial eólico do local onde se pretende instalar uma turbina ou mesmo um parque eólico, isto é, deve-se prever o potencial de transformação de energia eólica em elétrica. Além disso, o conhecimento do regime de ventos local também é o parâmetro fundamental para determinar quais são as características necessárias das turbinas eólicas que devem ser instaladas naquele terreno.

Então, prever o potencial eólico de uma determinada região é uma tarefa importante do ponto de vista econômico e financeiro sob dois aspectos, primeiro deve-se investir em terrenos de regiões que tenham melhores regimes de vento ao longo do ano. E, para um dado terreno, a escolha (aquisição) e posicionamento (construção de torres) de uma turbina ou parque eólico dependem fundamentalmente do regime de ventos específicos daquela região, *i. e.*, mesmo que em terrenos vistos na proporção de meso-escala não tenha ventos constantes e com potencial eólico médio importante, sabe-se que localmente (micro-escala) existem relevos de

1 Universidade Federal de Goiás - bruno_leal@discente.ufg.br.

2 Universidade Federal de Goiás - fpmariano@ufg.br.

geografia específica que favorecem a formação de ventos mais estáveis e aumentam pontualmente o potencial eólico em um determinado terreno.

No presente trabalho, pretende-se estudar o escoamento de ventos em terrenos, a princípio, planos, e que podem ser modelados utilizando a teoria da camada limite (White; Corfield, 2006) a partir do *software* OpenFOAM (2021), o qual é um programa em linguagem C++ para o desenvolvimento de ferramentas de análise computacional com pré e pós-processamento para solução de problemas da mecânica do contínuo, incluindo Dinâmica dos Fluidos Computacional e as diversas situações e cenários que englobam o escoamento de ventos sobre um terreno. Nesse viés, o programa pode prever, de forma mais barata, qual o potencial eólico local e qual turbina é adequada para determinado terreno.

Metodologia

As simulações abordam, a princípio, os casos com terrenos planos, com escoamento em regime laminar. Por se aproximar ao caso da placa plana, as soluções analíticas de Blasius podem ser usadas para validação.

A solução de Blasius (Çengel; Cimbala, 2012) permite a resolução analítica do conjunto de equações que modelam matematicamente a camada limite. Considerando o escoamento sobre a placa plana: permanente, incompressível, bidimensional (plano xy) e o número de Reynolds suficientemente grande para que a aproximação seja razoável, ainda satisfazendo o estado laminar, calcula-se o perfil velocidade.

Considera-se que o fluido se aproxima da superfície com uma velocidade uniforme V_{∞} . Nesse encontro placa-fluido, a velocidade das partículas na superfície é zero devido à condição de não-escorregamento, e essa camada sem movimento acaba por retardar as partículas vizinhas devido ao atrito, criando camadas adjacentes com diferentes velocidades. Isso se propaga para as camadas seguintes, fazendo com que a presença da placa seja sentida até uma distância normal δ da placa.

Para se realizar a simulação da placa plana no *software* OpenFOAM, deve-se inserir a geometria a ser estudada, condições de contorno, propriedades do fluido e variáveis numéricas adequadas. Da construção da

malha (Figura 1) até as condições de contorno do escoamento, as hipóteses devem ser as mesmas daquelas discutidas por Blasius. Diversas malhas devem ser testadas a fim de garantir a convergência numérica da simulação e validando o problema proposto.

Figura 1 - Malha para simulação do escoamento sobre placa plana

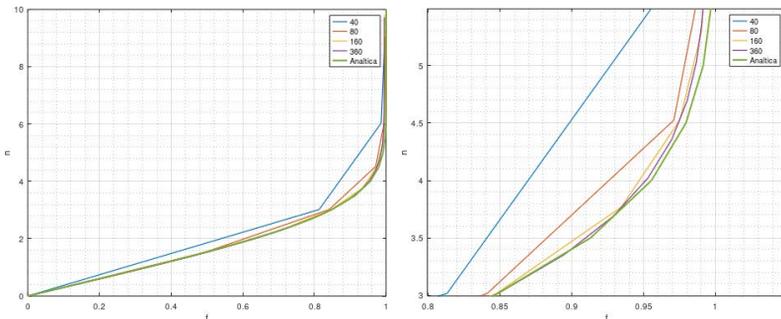


Fonte: Elaboração própria.

Resultados e discussão

Na Figura 2 observa-se o perfil de velocidade ao longo da coordenada y . Na superfície inferior ($y=0$) tem-se o déficit de velocidade provocado pelo contato do fluido com a placa plana. Ao mesmo tempo, observa-se que o comprimento do domínio na direção vertical é suficiente, já que a maior parte do domínio atinge a velocidade de corrente livre, sendo que a camada limite é bem mais esbelta.

Figura 2 - Resultados do perfil de velocidade com o refinamento de malha



Fonte: Elaboração própria.

Os resultados do perfil velocidade das 4 malhas no ponto de avaliação é então exportado e os dados obtidos são comparados com a solução analítica de Blasius. Classifica-se as malhas em relação ao seu número de pon-

tos no eixo y . À medida que há o seu refinamento, percebe-se sua aproximação com a curva analítica.

Conclusões

A malha mais refinada é a que demonstra maior exatidão de resultados, tendo a maior região de discrepância na curva de transição da camada limite para o escoamento livre, como pode ser observado na Figura 2, onde as forças viscosas param de agir. Mesmo com essas desconformidades, os resultados são satisfatórios e demonstram que a simulação está correta quanto as condições de contorno, portanto, verossímil.

Para se obter uma curva ainda mais próxima do real, um maior número de pontos deve ser usado, no entanto, consome-se maior recurso computacional, tanto de tempo de simulação quanto de uso de memória RAM. Outro parâmetro que pode ser melhorado é o método de discretização no tempo. Embora não citado no presente trabalho por fugir do escopo do estudo inicial, utilizou-se a discretização de Euler. O método de Runge-Kutta ou outros poderiam apresentar melhores resultados em menor tempo.

A próxima etapa consiste em aumentar a velocidade do vento, obtendo escoamentos turbulentos, os quais são mais próximos da realidade esperada em parques eólicos. Nesta etapa, as comparações devem ser feitas com resultados experimentais obtidos por outros pesquisadores participantes desse mesmo projeto de pesquisa.

Agradecimentos

Os autores agradecem a FURNAS Centrais Elétricas e ao “Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico” (P&D) da ANEEL pelo apoio financeiro.

Referências

ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. *Mecânica dos fluidos: fundamentos e aplicações*. Tradução de Katia Aparecida Roque e Mario Moro fecchio. 3. ed. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda, 2012.

WHITE, F. M. *Mecânica dos fluidos*. 6. ed. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda, 2011.

SIMULAÇÕES NUMÉRICAS E COMPUTACIONAIS DE ESCOAMENTOS EM AMBIENTES INTERNOS PARA FINS DE OTIMIZAÇÃO DO SISTEMA DE VENTILAÇÃO

Gustavo Gonçalves Gratao,¹ Felipe Pamplona Mariano²

Introdução

A pandemia de SARS-COV-2 trouxe à tona um problema que a tempos vem causando preocupação: a qualidade do ar que se respira em ambientes fechados. É cada vez mais comum encontrar ambientes fechados que utilizam equipamentos de climatização. Porém, a maioria desses equipamentos tem como função principal apenas climatizar o ambiente, sem levar em considerações os parâmetros para qualidade do ar.

Essa preocupação se agrava ainda mais quando se trata de Estabelecimentos de Assistência à Saúde (EAS) (ABNT, 2021). Nesses ambientes, além da preocupação da qualidade do ar, existe também a preocupação de se evitar a propagação de doenças.

Com isso, o presente trabalho consiste em estudar o escoamento de ar em ambientes fechados, não só de acordo com o posicionamento das grelhas de insuflamento e exaustão, como também de acordo com a velocidade

1 Universidade Federal de Goiás – gustavo.gratao@discente.ufg.br.

2 Universidade Federal de Goiás – fpmariano@ufg.br.

e direção do fluxo de entrada do ar, com o objetivo de se determinar qual a melhor forma de realizar a renovação de ar em determinado ambiente.

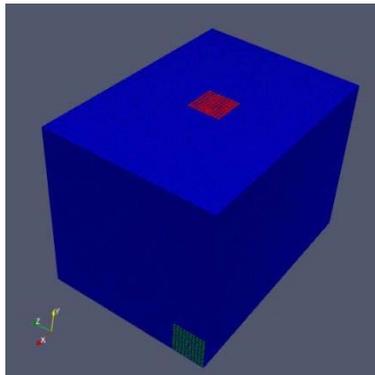
Para o estudo, foi considerado um consultório de odontologia da Faculdade de Odontologia da Universidade Federal de Goiás. Este local foi escolhido devido ao risco ao qual os profissionais da odontologia e seus pacientes estão expostos no contexto da Covid-19 (Who, 2021).

Metodologia

O escoamento do ar dentro do ambiente fechado foi realizado utilizando a Dinâmica dos Fluidos Computacional e o programa OpenFOAM, o qual utiliza o método dos volumes finitos de segunda ordem para discretização espacial das equações que modelam a dinâmica dos fluidos (OpenFOAM, 2021).

O primeiro passo para realizar as simulações foi construir a malha de acordo com as dimensões do consultório em questão, vide Figura 1. No presente trabalho, é feita a análise de refinamento utilizando três diferentes malhas, com 0,05 nas direções x, y, z, 0,025 nas direções x, y, z, e 0,0167 nas direções x, y e z.

Figura 1 - Malha utilizada na discretização do domínio



Fonte: Elaboração própria.

Com a malha pronta, o próximo passo é impor as condições de contorno e definir a quantidade de locais onde haverá renovação de ar, impondo

velocidade, pressão e seus respectivos gradientes de forma apropriada, de acordo com a quantidade e a direção do insuflamento desejada. Na Figura 1 as superfícies marcadas de vermelho representam as passagens de ar e as superfícies em azul representam as paredes do ambiente.

Utilizando o algoritmo icoFoam, o qual resolve as equações de Navier-Stokes a partir do método de acoplamento pressão-velocidade SIMPLE (OpenFOAM, 2021), realizam-se as simulações.

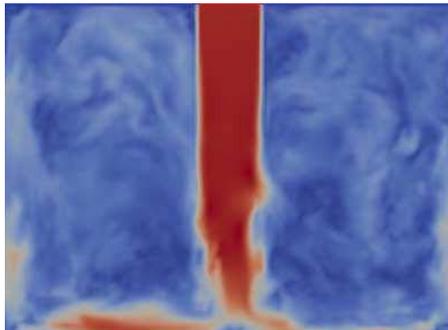
O avanço temporal utilizado para a malha com 0,05 foi de 0,025 segundo, para a malha de 0,025 o avanço é de 0.03074 segundo e para malha 0,0167 foi utilizado 0,0205 segundos. Esses valores foram obtidos a partir do número de Courant igual a 0,5 (OpenFOAM, 2021).

Após as simulações feitas, o último passo é comparar os resultados obtidos com o objetivo de determinar qual o melhor método para a renovação de ar no ambiente. Para isso, é levado em consideração tanto os parâmetros de confortos térmicos definidos em Anvisa (2003) quanto a quantidade de recirculações de ar proveniente do escoamento.

Resultados e discussão

A priori, representa-se a situação atual do consultório odontológico em estudo, considerando um ponto de insuflamento no teto e uma veneziana para exaustão na porta, vide Figura 2.

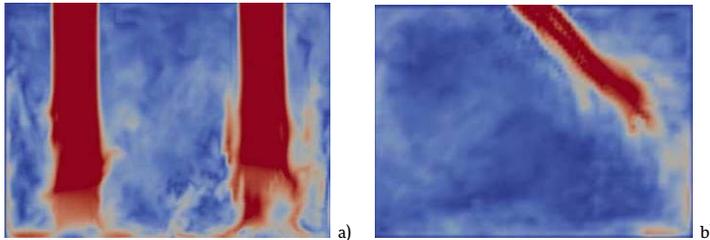
Figura 2 - Campo de velocidade em um plano que corta o centro da entrada única de ar no ambiente



Fonte: Elaboração própria.

A segunda parte dos resultados, consiste em avaliar a influência do número de pontos de insuflamento e da direção do insuflamento. Para tanto, são simulados o ambiente com duas entradas de ar e com insuflamento a um ângulo de 45° com a horizontal (Figura 3).

Figura 3 - (a) Dois pontos de insuflamento; (b) insuflamento a 45°.



Fonte: Elaboração própria.

Conclusões

No presente trabalho, é demonstrado que é possível realizar simulações com diferentes configurações de sistemas de ventilação utilizando o programa computacional OpenFOAM. Dessa forma, o próximo passo é otimizar o posicionamento dos difusores e grelhas de ventilação para garantir a qualidade do ar interior, reduzindo de forma significativa os riscos de contaminação cruzada entre os pacientes e os dentistas.

Também, como continuação deste trabalho, pretende-se resolver a equação da energia e fornecer parâmetros para que seja possível aplicar os resultados não só em estabelecimentos de assistência à saúde, mas em ambientes fechados e com dimensões variadas de ventilação e conforto térmico.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Ministério Público do Trabalho de Goiás pelo apoio financeiro e à Faculdade de Odontologia da UFG pela infraestrutura fornecida.

Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA (ANVISA). Resolução-RE nº 09, de 16 de janeiro de 2003. Disponível em: http://antigo.anvisa.gov.br/documents/10181/2718376/RE_09_2003_.pdf/8cca9c91-1437-4695-8e3a-2a97deca4e10. Acesso em: 25 abr. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Tratamento de ar em estabelecimentos assistenciais de saúde (EAS) - Requisitos para projeto e execução das instalações: NBR 7256 . Rio de Janeiro, 2005.

OPENFOAM. User guide. *OpenFOAM*, c2017-2019. Disponível em: <https://www.openfoam.com/documentation/guides/latest/doc/index.html>. Acesso em: 20 ago. 2021.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). *Roadmap to improve and ensure good indoor ventilation in the context of COVID-19*, [S. l.], 1 March 2021. Disponível em: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240021280>. Acesso em: 25 nov. 2021.

ESCOAMENTO SOBRE UM CILINDRO FIXO COM BAIXO NÚMERO DE REYNOLDS

Thiago Rogaleski Marques,¹ Andreia Aoyagui Nascimento²

Introdução

Nos trabalhos de Mariano (2011) e Nascimento (2016), os autores usaram o método pseudoespectral de Fourier (MPEF) acoplado à metodologia da fronteira imersa (MFI), *direct-forcing*, para solução de problemas de interação fluido-estrutura. Mariano (2011) aplicou a metodologia para modelagem da queda para um corpo rígido e Nascimento (2016) na modelagem da movimentação de um corpo rígido (*2-way*), ambos trabalhos mostraram a grande potencialidade do MPEF em tal aplicação.

O presente trabalho é uma continuidade do estudo do método pseudoespectral de Fourier acoplado à metodologia da fronteira imersa aplicados em escoamento sobre cilindros, que busca o entendimento da influência da disposição das torres eólicas na formação e desprendimento de vórtices no escoamento. Aplicando-se a Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD) é possível fazer uma investigação numérica a partir da equação de Navier-Stokes.

Para o desenvolvimento foi usado um código computacional, validado e verificado denominado IMERSPEC2D. Além disso, foi desenvolvida uma sub-rotina que insere duas geometrias lagrangeanas no domínio euleriano.

1 Universidade Federal de Goiás – thiagorogaleski@discente.ufg.br.

2 Universidade Federal de Goiás – aanascimento@ufg.br.

Metodologia

A metodologia matemática empregada no presente trabalho usa a equação da conservação da massa (1) e as equações de Navier-Stokes (2) e (3) para um fluido newtoniano, isotérmico, com propriedades constantes, onde ρ é a massa específica, μ é a viscosidade, p é a variável de pressão, u é a velocidade na direção horizontal, v é a velocidade na direção vertical, t é a variável tempo, e f_i é o termo fonte da equação.

$$\partial u_j / \partial x_j = 0 \quad (1)$$

$$\rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) = \rho \frac{du}{dt} + f_i \quad (2)$$

$$\rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) = \rho \frac{dv}{dt} + f_i \quad (3)$$

O modelo numérico utilizado consiste no uso de dois domínios: o domínio físico, onde todo o fenômeno físico e cálculo de produtos ocorre, e o domínio espectral, o qual engloba o domínio físico e onde é feito o cálculo das derivadas. Faz-se necessárias as transformações das variáveis para a forma espectral, conforme apresentado em (4), esta metodologia está bem detalhada nos trabalhos de Nascimento (2016) e Mariano (2011).

$$\left[\frac{\partial}{\partial t} \nu k^2 \right] \widehat{u}_i(\vec{k}, t) = \Phi_{im} \left[\widehat{f}_m(\vec{k}, t) - ik_j \int_{\vec{k}=\vec{r}+\vec{s}} \widehat{u}_m(\vec{r}, t) \widehat{u}_j(\vec{k} - \vec{r}, t) d\vec{r} \right] \quad (4)$$

Na equação (4), nota-se que a pressão foi desacoplada da equação, o que ocorre devido a projeção de cada termo da equação de Navier-Stokes transformada (Briggs *et al.*, 1995).

O avanço temporal (5) depende da condição de Courant-Friedrichs-Lewis (CFL), onde é um número entre 0 e 1, dependendo do seu esquema de integração e do escoamento simulado.

$$\Delta t = CFL * \min \left[\min \left[\frac{\Delta x}{\max[|u|]}, \frac{\Delta x}{\max[|v|]} \right]; \frac{2}{\nu} \left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} \right) \right] \quad (5)$$

O domínio físico se caracteriza por três zonas, a zona de Buffer, que impede a condição periódica do MPEF, a zona de força, onde é imposta a

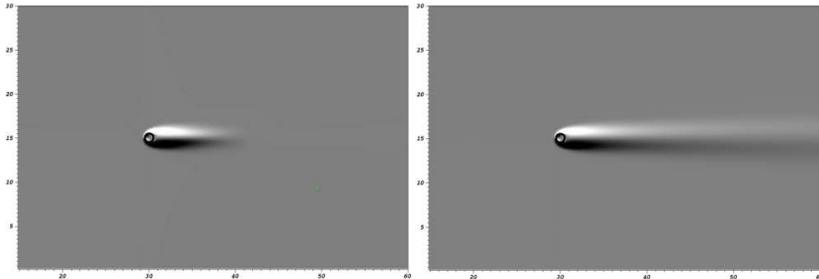
condição inicial para cada passo de tempo, e o domínio útil, onde ocorre o problema físico.

O escoamento é aplicado com um número de Reynolds (Re) igual a 40, sobre um cilindro fixo de diâmetro igual a 0,0016 metros, uma malha de refinamento com 512 x 256 pontos, tendo uma velocidade máxima (u) de 1 m/s.

Resultados e discussão

Para este caso, o escoamento formou uma região de baixa pressão jussante ao cilindro, gerando duas recirculações, próximas ao mesmo, obtendo ao longo do tempo um escoamento laminar e estável, formando a esteira do escoamento, como mostrado na Figura 1.

Figura 1 - Esteira do escoamento



Fonte: Elaboração própria.

Com uma análise gráfica é possível obter as dimensões das recirculações e comparar com a referência e também obter o coeficiente de arrasto médio.

Tabela 1 - Comparação das posições de centro (X_c e Y_c), ponto de estagnação (L_c) e coeficiente de arrasto médio (C_d)

Trabalhos	X_c	Y_c	L_c	C_d
Mariano (2011)	1,29	0,32	3,06	1,62
Presente trabalho	1,29	0,30	3,94	1,62

Fonte: Elaboração própria.

Conclusões

Portanto, é possível concluir que a CFD é uma forte ferramenta para análise de escoamentos, podendo variar a geometria, número de Reynolds, comprimento do domínio, tempo, entre outras variáveis.

Foi possível fazer a validação do código computacional e da sub-rotina implementada para o estudo, obtendo resultados muito próximos das referências utilizadas.

Agradecimentos

Os autores agradecem a FURNAS Centrais Elétricas e ao “Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico” (P&D) da ANEEL pelo apoio financeiro.

Referências

BRIGGS, W. L.; HENSON, V. *The DFT: an owner's manual for the discrete Fourier transform*. Philadelphia: Society for industrial and Applied Mathematics, 1995.

MARIANO, F. P. *Soluções Numéricas de Navier-Stokes: Utilizando uma Híbridação das Metodologias Fronteira Imersa e Pseudoespectral de Fourier*. 2011. Tese (Doutorado em Engenharias) – Faculdade de Engenharia Mecânica - FEMEC, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011.

NASCIMENTO, A. A. *Métodos pseudoespectral de Fourier e fronteira imersa aplicados a escoamentos simplificados de engenharia de perfuração*. 2016. Tese (Doutorado em Engenharias) – Faculdade de Engenharia Mecânica - FEMEC, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2016.

ANÁLISE NUMÉRICA DE ESCOAMENTOS EM CAVIDADE COM TAMPA DESLIZANTE UTILIZANDO O OPENFOAM

Carlos Daniel Silva Pinto,¹ Felipe Pamplona Mariano²

Introdução

A aproximação de um problema físico em um modelo numérico se faz por meio de um modelo matemático e posteriormente aproxima-se as derivadas parciais envolvidas por aproximações numéricas, transformando, desta forma, o problema contínuo em discreto. Para tal execução, existem os seguintes métodos: método dos volumes finitos, método das diferenças finitas, métodos espectrais e método dos elementos finitos. A este projeto apresenta-se uma análise comparativa do OpenFOAM, o qual utiliza do método dos volumes finitos para discretização do domínio físico, com malha uniforme e não uniforme. As características analisadas no escoamento abordam formação dos vórtices e perfis de velocidade para diferentes números de Reynolds.

1 Universidade Federal de Goiás (UFG) – carlospinto@discente.ufg.br.

2 Universidade Federal de Goiás (UFG) – fpmariano@ufg.br.

Metodologia

No *software* OpenFOAM estão implementadas a equação de balanço de massa, (1), e a equação de balanço de quantidade de movimento linear, (2) e (3), as quais são utilizadas para modelar o escoamento incompressível de um fluido newtoniano e isotérmico nas direções x e y (Maliska, 2017; Fortuna, 2000).

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial (uv)}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right), \quad (1)$$

$$\frac{\partial (u)}{\partial x} + \frac{\partial (v)}{\partial y} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial (uv)}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right), \quad (3)$$

Nesse viés, u é a componente de velocidade, em [m/s], no eixo x , v é a componente de velocidade, em [m/s], no eixo y , ν é a viscosidade cinemática do fluido [m²/s], p é a pressão em [Pa], t é a variável referente ao tempo em [s] e ρ é a massa específica do fluido [kg/m³].

O número de Courant, C_0 , é um parâmetro utilizado para garantir a convergência numérica dos resultados de uma simulação, conforme a equação (4), a seguir:

$$C_0 = \frac{|U| \cdot \Delta t}{\Delta x}, \quad (4)$$

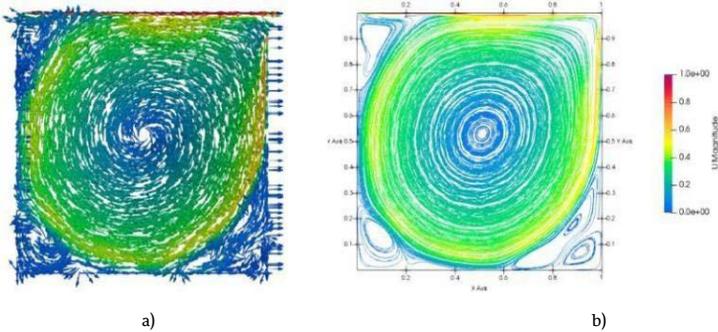
em que Δt é o intervalo de tempo entre cada iteração, U é a magnitude da velocidade de referência e Δx é o menor comprimento do volume. Esses valores são necessários para que, em determinado Δt o fluido não se desloqueie a uma distância maior que o Δx definido.

No presente trabalho, utilizou-se de dois métodos de avanço temporal: o método de Euler Implícito e o Método de Crank-Nicolson. Além disso, optou-se pelo algoritmo de acoplamento pressão-velocidade PISOFOAM.

Resultados e discussão

Para testar a influência da malha não uniforme, utiliza-se o problema da Cavidade com Tampa Deslizante. Na Figura 1, observa-se que a maior velocidade está no fluido próximo à superfície deslizante, enquanto na parcela próxima ao centro da recirculação a velocidade é menor. Na Figura 2 está apresentada a segunda situação, que aborda o refinamento local das malhas na região próxima às paredes da cavidade.

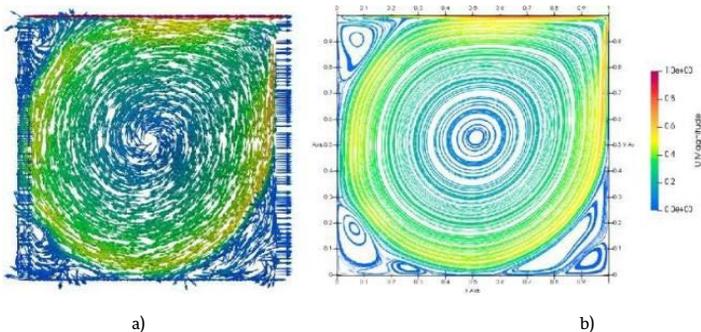
Figura 1 - (a) Campo vetorial de velocidade média; (b) linhas de corrente



Fonte: Elaboração própria.

Observando as Figuras 1 e 2, é possível notar a existência de recirculações presentes nos cantos da cavidade. Também, observa-se que as recirculações ficaram mais evidentes e melhor detalhadas na Figura 2, validando o refinamento local.

Figura 2 - (a) Campo vetorial de velocidade média; (b) linhas de corrente para malha 400x400.

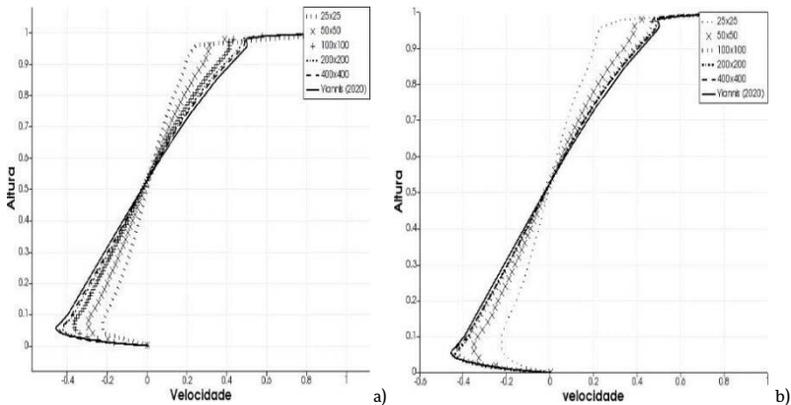


Fonte: Elaboração própria.

Os perfis de velocidade horizontal na posição $x/L = 0,5$ são apresentados na Figura 3, para as malhas de 25x25, 50x50, 200x200 e 400x400. Analisando a Figura 3a, nota-se que ao realizar o refino de todo domínio os resultados se aproximam da referência, sendo que, para as malhas de 200x200 e 400x400, foram os que mais se aproximaram.

Na Figura 3b estão os perfis de velocidade horizontal em relação à altura da cavidade, para as malhas 100x100, 200x200 e 400x400. Pode-se observar que os resultados se aproximam mais rapidamente da referência, tornando viável a utilização de uma malha menos refinada, diminuindo bastante o tempo de simulação e continuando com resultados satisfatórios.

Figura 3 - Perfis de velocidade horizontal na posição $x/L = 0,5$.



Fonte: Elaboração própria.

Conclusões

As paredes da cavidade têm grande influência no gradiente de velocidade, na representação das recirculações e na precisão da aferição nestes lugares, como analisado através da falta de convergência dos valores dos perfis de velocidade com a referência.

Com as simulações nas malhas não uniformes, houve considerável melhora na representação das recirculações e os gradientes de velocidade convergiram para o valor de referência mesmo com malhas menos refina-

das. Sendo assim, foi confirmado que o refinamento local na malha é mais eficaz do que o refinamento geral em uma malha uniforme.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Programa de Educação Tutorial (PET), ao Ministério da Educação (MEC) e ao FNDE pelo apoio financeiro.

Referências

FORTUNA, A. O. *Técnicas Computacionais para Dinâmica dos Fluidos*. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2000.

MALISKA, C. R. *Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional*. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

SOLUÇÃO COMPUTACIONAL DA DIFUSÃO TÉRMICA 2D PELO MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS

Pedro Eloi de Oliveira Rodrigues,¹ Andreia Ayoagui Nascimento²

Introdução

Com os métodos numéricos, busca-se soluções aproximadas de equações ou sistemas de equações diferenciais quando não se pode obter soluções contínuas. Para isso, é necessária a discretização do domínio e a transformação das derivadas em expressões algébricas que contenham a incógnita (Maliska, 2004).

Neste contexto, o método dos volumes finitos (MVF) tem sido amplamente utilizado para se obter um sistema de equações algébricas que substituam as equações diferenciais parciais (Neves *et al.*, 2013 *apud* Leveque, 2000). Segundo Maliska (2004), todo método que satisfaça o balanço da propriedade em nível de volumes elementares é um método de volumes finitos.

A equação da difusão térmica é uma equação diferencial parcial obtida a partir da aplicação da equação do balanço da energia em um volume de controle infinitesimal. Desta forma, é possível conhecer a distribuição de temperatura ao longo do corpo em estudo para cada instante de tempo (Incropera *et al.*, 2008).

1 Universidade Federal de Goiás (UFG) – pedrodeoliveira@discente.ufg.br.

2 Universidade Federal de Goiás (UFG) – aanascimento@ufg.br.

O presente trabalho busca aplicar o MVF para resolver computacionalmente a equação da difusão térmica em uma placa de aço AISI 304. Para isso, foi considerado um problema 2D, transiente, com propriedades constantes e sem transformação de energia:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (1)$$

em que α é a difusividade térmica.

Metodologia

O problema em questão foi implementado em Fortran 90. Para isso, foi utilizado o *software* CodeBlocks e o compilador GNU Fortran Compiler. Os gráficos, por sua vez, foram plotados a partir do *software* Visit 3.2.1. O micro utilizado foi o CPU Intel Core i7-7700 @ 3,60 GHz com oito núcleos de processamento e 16 Gb de RAM.

Para a discretização da equação (1) em volumes finitos, foi utilizado o método de Euler totalmente implícito (Maliska, 2004). Desta forma, para um determinado volume de controle P, a equação (1) foi integrada nas direções x e y, e no tempo, equação (2).

$$T_P^{t+\Delta t} = \frac{\alpha \Delta t}{\Delta x^2} (T_E - 2T_P + T_W) + \frac{\alpha \Delta t}{\Delta y^2} (T_N - 2T_P + T_S) + T_P^t \quad (2)$$

Aplicando a formulação implícita em (2) e reagrupando os termos iguais, tem-se:

$$A_P T_P^{t+\Delta t} = A_E T_E^{t+\Delta t} + A_W T_W^{t+\Delta t} + A_N T_N^{t+\Delta t} + A_S T_S^{t+\Delta t} + B_P^t, \quad (3)$$

em que os coeficientes de cada temperatura são reais e constantes. Portanto, a solução do problema pode ser obtida resolvendo o sistema linear construído a partir de (3).

O sistema linear foi resolvido iterativamente através do método Sobre Relaxação-Sucessiva (SOR) (Maliska, 2004), ao qual foi adotado um coeficiente de relaxação (w) de 0,25. A placa se encontra a uma temperatura

inicial de 30 °C, sendo discretizada em um total de 441 pontos. A difusividade térmica (α) e a condutividade térmica (k) da placa são as do aço AISI 304, presentes na Tabela 1.

As condições de contorno do problema foram discretizadas com o uso de volumes fantasmas. A discretização de um problema bidimensional por volumes fantasmas respeita aos princípios de conservação em todo o domínio (Maliska, 2004). A Figura 1 apresenta as condições de contorno adotadas para toda a placa.

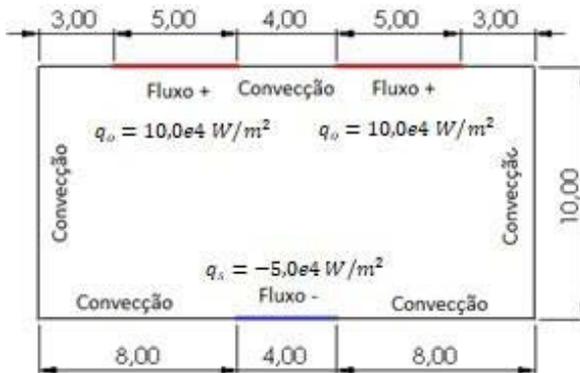
Tabela 1 - Propriedades física do aço AISI 304

α	k
$3,95e-6 \text{ m}^2/\text{s}$	$14,9 \text{ W/mK}$

Fonte: Incropera (2008).

Foi admitido um coeficiente de convecção de $200 \text{ W/m}^2\text{K}$ e uma temperatura ambiente de 30 °C.

Figura 1 - Condições de contorno da placa e dimensões em mm



Fonte: Elaboração própria.

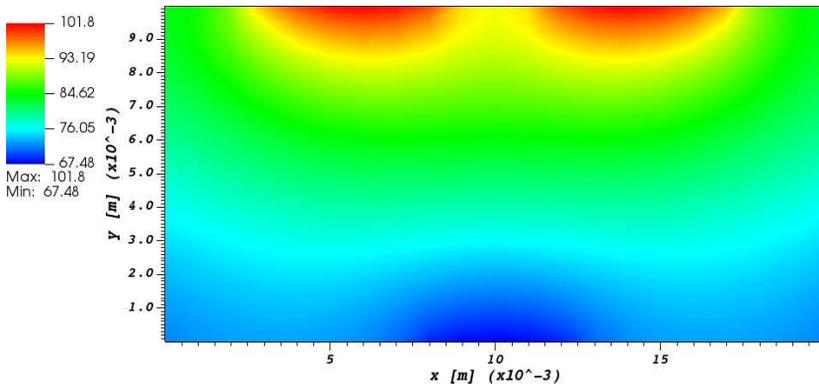
Resultados e discussão

Com base nas condições iniciais e de contorno pré-estabelecidas, foi obtida a distribuição de temperatura após 60s.

Percebe-se pela Figura 2, a seguir, que as maiores temperaturas se encontram nas regiões onde há o fluxo positivo, atingindo um máximo de 101,8 °C. Por outro lado, as menores temperaturas se encontram na região inferior da placa, onde há o fluxo negativo, atingindo um mínimo de 67,48 °C.

Também, é perceptível o efeito da difusão térmica observando o campo de temperatura ao longo da placa. A interface entre as diferentes camadas de cores apresenta uma geometria, aproximadamente, circular, evidenciando como a energia térmica se propaga através da placa.

Figura 2 - Distribuição de temperatura na placa no instante final



Fonte: Elaboração própria.

Conclusões

Aplicando a formulação totalmente implícita, o tempo de simulação para o problema em questão foi de, em média, 2,1s. Mantendo a constante de relaxação e o número de pontos, o tempo de simulação diminui à medida que a formulação se torna explícita.

No entanto, dado o baixo tempo de simulação para o primeiro caso, e considerando que a formulação implícita não limita o avanço no tempo, esta foi considerada a mais viável para o problema.

As temperaturas médias para cada formulação também se mostraram próximas umas às outras, evidenciando uma provável precisão nos resultados.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Ministério Público do Trabalho de Goiás pelo apoio financeiro e à Faculdade de Odontologia da UFG pela infraestrutura fornecida.

Referências

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. *Fundamentos de transferência de calor e massa*. 6 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

MALISKA, C. R. *Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional*. 2 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004.

NEVES, E. E.; BEZERRA, Y. S. F. Método dos volumes finitos: uma abordagem prática e aplicação em problemas de difusão térmica com MATLAB. *Carpe Diem: Revista Cultural E Científica do UNIFACEX*, v. 11, n. 1, p. 28-45, 2013.

MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS NA ANÁLISE DA EQUAÇÃO DE BURGUERS UNIDIMENSIONAL E INCOMPRESSÍVEL

Lucas Pavan da Silva,¹ Andreia Aoyagui Nascimento²

Introdução

Os fenômenos físicos considerados mais complexos são explicados matematicamente através de equações diferenciais parciais (EDP). Por não haver solução geral, a simulação numérica se torna essencial para a avaliação desses fenômenos. O presente trabalho utiliza o método dos volumes finitos (MVF), na sua formulação explícita, para discretizar a equação de Burgers, equação muito utilizada no estudo de escoamentos turbulentos.

Para realizar as simulações do presente trabalho faz-se necessário utilizar uma condição inicial, extraída de Canuto *et al.*, (1988) por meio da solução analítica, além de condições de contorno, sendo utilizados dois tipos: Dirichlet e periódica.

Ademais, há várias maneiras de realizar a discretização temporal e espacial dos termos da equação de Burgers, sendo que as discretizações temporais testadas foram feitas pelo método de Euler e método de Runge-kutta de quarta ordem (RK4). Já a discretização espacial utilizada foi a de segunda ordem. O objetivo dessa grande variedade de discretizações e

1 Universidade Federal de Goiás (UFG) – lucaspavandasilva@discente.ufg.br.

2 Universidade Federal de Goiás (UFG) – aanascimento@ufg.br.

condições de contorno é comparar os métodos e determinar qual das discretizações limita a exatidão dos resultados.

Metodologia

Destaca-se que há várias maneiras de expressar a equação de Burgers, sendo que a equação (1) expressa a sua forma convectiva:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = \nu \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \quad (1)$$

em que “u” é a velocidade, “t” o tempo, “x” a direção e “ν” a viscosidade cinemática. Na equação (1), o primeiro termo à esquerda da igualdade é chamado de termo transiente, o segundo é o termo advectivo e o termo à direita da igualdade é o termo difusivo.

O termo advectivo é um termo não-linear, por isso espera-se que ele seja o responsável por grande parte da inexatidão dos resultados das simulações. Para conferir essa afirmação, a equação de Burgers foi simulada em sua forma completa, como na equação (1), e na sua forma puramente difusiva, considerando o termo não linear nulo.

A forma da equação de Burgers utilizada neste trabalho é chamada de forma antissimétrica, vide equação (2).

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{2} u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{4} \frac{\partial u^2}{\partial x} = \nu \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}. \quad (2)$$

Analicamente, as equações (1) e (2) são equivalentes, no entanto, a parte invíscida da equação garante a conservação dos momentos angular e linear, além da conservação de energia cinética.

A discretização utilizando MVF, método de Euler na forma explícita para discretização temporal e discretização espacial de segunda ordem da equação de Burgers na forma antissimétrica, é apresentada na equação (3), a seguir:

$$u_P = u_P^0 + v \frac{\Delta t}{\Delta x^2} (u_E^0 - 2u_P^0 + u_W^0) - \frac{\Delta t}{16\Delta x} (u_E^0 + 6u_P^0 + u_W^0), \quad (3)$$

em que o subíndice indica o volume, “P” representa o volume principal, ou seja, o volume que está sendo analisado, “E” (*east*) representa o volume à direita do volume principal e “W” (*west*) o volume à esquerda. O superíndice representa o tempo, se não há superíndice o tempo é o atual tempo de análise, se há “0” o tempo é o anterior, “ Δt ” é o incremento temporal e “ Δx ” o comprimento do volume. Para as simulações os volumes são uniformes.

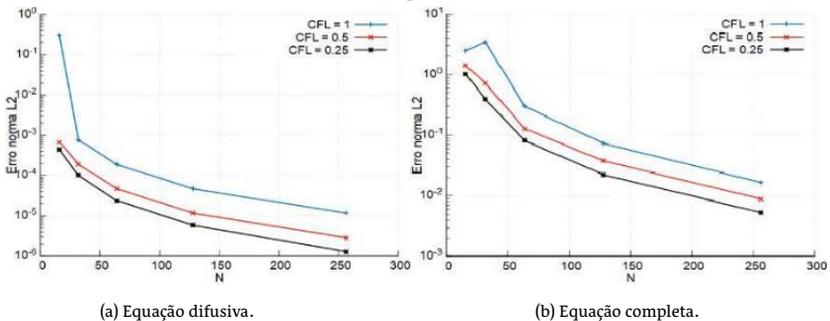
Para a escolha do incremento temporal foi utilizado o critério CFL, sendo utilizados 1,0, 0,5 e 0,25. E o domínio foi dividido em 16, 32, 64, 128 e 256 volumes, tendo o comprimento total de $-\pi$ à π , o tempo final de todas as simulações foi de $\pi/8$ s.

A condição de contorno de Dirichlet foi imposta nos volumes laterais pela imposição da solução analítica. Já a condição de contorno periódica considera que o último volume do domínio está conectado ao primeiro volume. E, por fim, a ordem de convergência das simulações é calculada.

Resultado e discussão

Os gráficos de erros na norma L2 da equação puramente difusiva e da equação completa utilizando método de Euler e condição de contorno de Dirichlet podem ser vistos na Figura 1.

Figura - Erro pela norma L_2 ; Euler com CC de Dirichlet



Fonte: Elaboração própria.

A utilização da CC periódica revelou pouca diferença. No entanto, deve ser salientado que para a condição de Dirichlet utilizada é necessário calcular a solução analítica de todos os tempos, diferente da CC periódica. Observando a Figura 1 é possível notar que a simulação da equação puramente difusiva é bem mais exata, chegando a erro de ordem 10^{-6} para CFL de 0,25 e número de malha de 256, enquanto a simulação da equação completa chega a erro de ordem 10^{-3} para as mesmas condições.

As ordens de convergência obtidas utilizando RK4 e CC periódica podem ser conferidas na Tabela 1, onde é possível verificar as ordens de convergência tanto para a equação difusiva quanto para a equação completa utilizando RK4 e condição de contorno periódica ficou em torno de 2. Esse dado revela uma importante característica da simulação: apesar de RK4 ser um método de discretização temporal de quarta ordem, a discretização espacial de segunda ordem limita a convergência do método, o que revela que a utilização de discretização temporal de alta ordem é inviável quando se utiliza a discretização espacial de baixa ordem.

Tabela 1 - Ordem de convergência: RK4; CC periódica

N	CFL=1,0		CFL=0,5		CFL=0,25	
	Dif.	Comp.	Dif.	Comp.	Dif.	Comp.
16-32	2,44	-0,25	2,07	0,86	2,17	1,22
32-64	2,07	3,43	2,02	2,47	2,03	2,23
64-128	2,01	1,82	2,00	1,74	2,02	1,85
128-256	2,00	2,13	1,97	2,08	2,24	2,06

Fonte: Elaboração própria.

Conclusões

Os resultados encontrados estão de acordo com o esperado: a equação puramente difusiva possui menor erro devido à ausência do termo não-linear; a discretização espacial de baixa ordem limita a convergência da simulação mesmo que a discretização temporal seja de maior ordem; não há diferença na ordem de convergência entre os dois tipos de equação, o que é evidência de que a ordem de convergência é consequência dos métodos de discretização utilizados e não da equação simulada.

Agradecimentos

Os autores agradecem a FURNAS Centrais Elétricas e ao “Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico” (P&D) da ANEEL pelo apoio financeiro.

Referências

CANUTO, C.; HUSSAINI, M. Y.; QUARTERONI, A.; ZANG, T. A. *Spectral Methods in Fluid Dynamics*. 2 ed. Nova York: Springer-Verlag, 1988.

HOPF, E. The partial differential equation . *Communications on Pure and Applied Mathematics*, v. 3, n. 3, p. 201-203, 1950. DOI: <https://doi.org/10.1002/cpa.3160030302>.

AVALIAÇÃO DOS NÍVEIS DE PRESSÃO SONORA EM UM TÚNEL DE VENTO DE CIRCUITO ABERTO E A SAÚDE OCUPACIONAL

Maycon Marques de Jesus Souza,¹ Diogo Appel Colvero,²
Andreia Aoyagui Nascimento,³ André Luiz Carneiro Franco,⁴
Felipe Mariano Pamplona,⁵ Marlipe Garcia Fagundes Neto⁶

Introdução

A poluição sonora é algo cada vez mais presente na sociedade, tendo em vista que, quanto maior a concentração populacional de uma região, maior é a produção de ruídos (Thompson *et al.*, 2022). Mesmo sendo algo que afete significativamente o meio ambiente, a poluição sonora muitas vezes é deixada de lado em relação à outras poluições (Masum *et al.*, 2021). Em países como a China, esta negligência levou à alta propagação de ruídos, de modo a se tornar um dos principais riscos ambientais do país, junto com a poluição do ar (Ma *et al.*, 2021).

Tendo em vista este problema, diversos estudos vem surgindo nos últimos anos para estudar os efeitos dos ruídos acústicos no corpo humano.

1 Universidade Federal de Goiás (UFG) – maycon.marques@discente.ufg.br.

2 Universidade Federal de Goiás (UFG) – diogocolvero@ufg.br.

3 Universidade Federal de Goiás (UFG) – aanascimento@ufg.br.

4 Universidade Federal de Goiás (UFG) – andre franco1986@ufg.br.

5 Universidade Federal de Goiás (UFG) – fpmariano@ufg.br.

6 Universidade Federal de Goiás (UFG) – marlipe@ufg.br.

Parte desses estudos são focados no ambiente de trabalho, que geralmente é um dos locais onde o ser humano mais ocupa parte do seu dia, cerca de 1/3. Alguns estudos já apontam leves degradações não relacionadas à audição mas à condição física de pessoas que trabalham próximas de máquinas que geram emissão sonora em relação às pessoas que não trabalham nessas condições (Cardoso *et al.*, 2006). Além de degradações físicas, foi notado que a alta exposição sonora gerou um aumento em problemas cognitivos nas populações expostas (Thompson *et al.*, 2022).

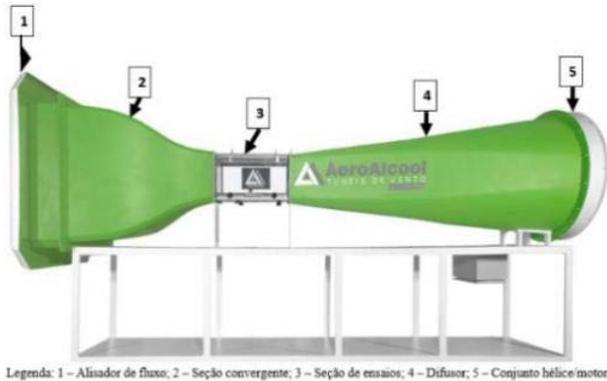
Um dos locais onde se deve avaliar os níveis de intensidade de pressão sonora são os túneis de vento (TV). O TV é um equipamento usado em diversas áreas (Merrison, 2011), indo da indústria automobilística ao setor de telecomunicações. Sendo assim, neste estudo fez-se a avaliação dos níveis de pressão sonora de um TV de circuito aberto. O objetivo foi avaliar se os níveis de ruído emitidos por este equipamento estavam além dos permitidos pelos documentos legais, o que poderia estar prejudicando a saúde de quem o opera.

Metodologia

Para realizar este estudo, inicialmente foi feita uma revisão bibliográfica para compreender o funcionamento e identificar os tipos de TV, além das vantagens e desvantagens que um tem em relação ao outro. Ao saber esses pontos, foi possível focar o trabalho na identificação dos níveis de pressão sonora do TV.

Como objeto de trabalho foi usado um TV de circuito aberto (Figura 1). Essa escolha se deu por tratar-se de um equipamento que, durante os testes operacionais, emitia níveis de pressão sonora que indicavam a necessidade de medidas de proteção individual aos trabalhadores.

Figura 1 - Túnel de vento formado por alisador de fluxo (ponto 1), seção de ensaios (ponto 3) e conjunto hélice/motor (ponto 5)

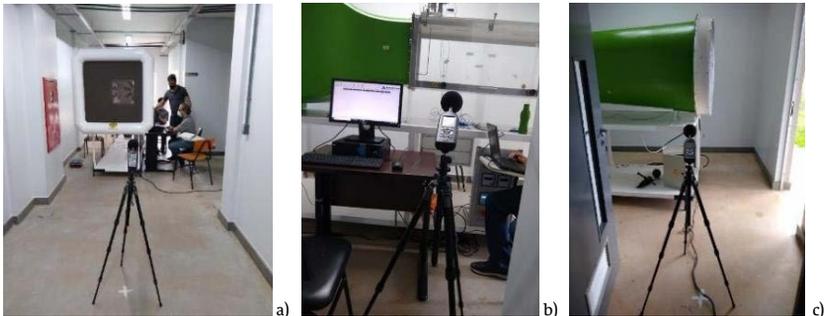


Legenda: 1 – Alisador de fluxo; 2 – Seção convergente; 3 – Seção de ensaios; 4 – Difusor; 5 – Conjunto hélice/motor.

Fonte: Elaboração própria.

Conhecendo-se o problema, deu-se início à parte experimental do estudo, que se consistiu na medição dos níveis de ruído produzidos pelo TV a ser analisado. Para essas medições, foi usado um medidor de pressão sonora da marca Larson Davis, modelo 831, em três diferentes pontos do TV, sendo eles próximos ao alisador de fluxo (Figura 2a), à seção de ensaios (Figura 2b) e ao conjunto hélice/motor (Figura 2c).

Figura 2 - (a) Medição próximo: alisador de fluxo; (b) seção de ensaios; (c) conjunto hélice/motor



Fonte: Elaboração própria.

Com as medições dos níveis de ruído feitas, os resultados foram analisados. Com base nas diretrizes da NR-15 (Brasil, 2022) e da NHO 01 (Brasil, 2001), que definem os critérios de seleção do tipo de protetor auditivo para atenuação de ruído, foram propostas medidas para preservar o bem-estar das pessoas que viriam a usar o TV.

Resultados e discussão

Os resultados apresentados na Tabela 1 mostram os altos valores de pressão sonora produzida pelo TV avaliado. Com essa informação, medidas baseadas nas diretrizes NR-15 e NHO 01 poderão ser tomadas visando o bem-estar de quem irá operar o TV.

Entre as opções possíveis analisadas, a mais apropriada é a do uso de protetores auditivos que atenuem os níveis de ruído para valores inferiores a 80 dB, permitindo que o trabalhador atue no equipamento diariamente durante 8 horas seguidas.

A outra opção seria a atuação diária de, no máximo, 22,5 minutos no TV, pois para um nível de ruído de 102 dB a dose de 100% permite o trabalho por um período de 45 minutos. Porém, 22,5 minutos não é tempo suficiente para realização de testes no TV analisado, tornando essa opção inferior à apresentada anteriormente.

Tabela 1 - Níveis de ruído em três diferentes pontos do túnel de vento

	5,0 (m/s)	10 (m/s)	15 (m/s)	20 (m/s)	25 (m/s)	30 (m/s)	35 (m/s)
Alisador de fluxo	53.4 (dB)	67.2 (dB)	77.8(dB)	85.5 (dB)	88.3 (dB)	94.3 (dB)	100.0 (dB)
Seção de ensaios	53.3 (dB)	66.4 (dB)	76.9 (dB)	85.6 (dB)	88.1 (dB)	93.4 (dB)	98.1 (dB)
Hélice/motor	56.9 (dB)	69.2 (dB)	80.8 (dB)	88.3 (dB)	91.9 (dB)	98.1 (dB)	102.4 (dB)

Fonte: Elaboração própria.

Conclusões

A avaliação dos níveis de pressão sonora em um TV de circuito aberto permitiu identificar a necessidade de se tomar medidas de proteção individual. Para a velocidade mais elevada do TV (35 m/s), na região do conjunto hélice/motor, o nível de pressão sonora emitido chegou a 102 dB, apontando a necessidade de os trabalhadores que operam o TV usarem um protetor auditivo que reduza esse ruído para 80 dB.

Portanto, esse estudo apontou a importância do controle do ruído em um TV, pois os trabalhadores estavam expostos a níveis de pressão sonora que certamente trariam danos à sua saúde com o passar do tempo.

Agradecimentos

Os autores agradecem a FURNAS Centrais Elétricas e ao “Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico” (P&D) da ANEEL pelo apoio financeiro.

Referências

- BRASIL. Fundacentro. *Avaliação da Exposição Ocupacional ao Ruído: NHO01*. Ministério do Trabalho e Emprego, 2001.
- BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. *Atividades e Operações Insalubres: NR 15*. Brasília: Ministério do Trabalho e Emprego, 2022.
- CARDOSO, A. P.; OLIVEIRA, M. J. R.; SILVA, A. M.; ÁGUAS, A. P.; PEREIRA, A. S. Effects of long term exposure to occupational noise on textile industry worker's lung function. *Revista Portuguesa de Pneumologia (English Edition)*, v. 12, n. 1, p. 45-59, Jan./Feb. 2006. DOI: [https://doi.org/10.1016/S2173-5115\(06\)70387-6](https://doi.org/10.1016/S2173-5115(06)70387-6).
- MA, J.; LIU, G.; KWAN, M. P.; CHAI, Y. Does real-time and perceived environmental exposure to air pollution and noise affect travel satisfaction? evidence from Beijing, China. *Travel Behaviour and Society*, v. 24, p. 313-324, July 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tbs.2021.05.004>.

MASUM, M. H.; PAL, S. K.; AKHIE, A. A.; RUVA, I. J.; AKTER, N.; NATH, S. Spatio temporal monitoring and assessment of noise pollution in an urban setting. *Environmental Challenges*, v. 5, December 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100218>.

MERRISON, J. Environmental Wind Tunnels. In: OKAMOTO, S. *Wind Tunnels*. 1. ed. [S.l.]: IntechOpen, 2011.

THOMPSON, R.; SMITH, R. B.; BOU KARIM, Y.; SHEN, C.; DRUMMOND, K.; TENG, C.; TOLEDANO, M. B. Noise pollution and human cognition: An updated systematic review and meta-analysis of recent evidence. *Environment International*, v. 158, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106905>.

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DOS MATERIAIS DE ABSORÇÃO SONORA NOS PARÂMETROS OBJETIVOS DE SALAS

Leonardo Dornel de Mello,¹ Marlipe Garcia Fagundes Neto²

Introdução

Este trabalho tem o objetivo de estudar e testar o campo sonoro em ambiente fechado através dos parâmetros acústicos em salas obtidos por experimento e compará-los com equacionamentos previsionais da acústica estatística.

A formação do campo sonoro em salas ocorre devido à parcela direta e indireta. A parcela direta corresponde à energia sonora proveniente da fonte até o receptor, esta possui baixa dependência das propriedades acústicas do ambiente. O campo indireto é formado pelas inúmeras reflexões presentes no ambiente fechado, sendo dependente da geometria, lei-oute dos objetos e propriedades acústicas dos elementos. Neste sentido, há os parâmetros objetivos que caracterizam o campo sonoro ou a qualidade acústica de um ambiente fechado.

O tempo de reverberação, principal e mais conhecido parâmetro objetivo, expressa o tempo de decaimento de 60 dB da energia sonora em um ambiente fechado. Gerges (2000) e Brandão (2016) listam em suas obras outros parâmetros, como intensidade, impressão espacial, clareza, brilho

1 Universidade Federal de Goiás - dornel@discente.ufg.br.

2 Universidade Federal de Goiás - marlipe@ufg.br.

e outros. Ainda, esses autores relatam que existem equações previsionais do tempo de reverberação e outros parâmetros que em função da geometria e propriedades acústica objetivam estimar esses valores. No entanto, poucos são os equacionamentos que preveem a posição dos elementos com propriedades absorventes sonoras.

Assim como nos trabalhos de Rocha (2014) e Herrmann (2018), serão calculados os dados previsionais e realizados os testes no ambiente, mas, ao invés de como foi feito por Rocha, onde o objetivo principal era o isolamento acústico, e por Herrmann, que tinha o objetivo de avaliar o índice de transmissão de fala (STI), neste trabalho serão analisados os leiautes, a fim de encontrar o valor mais adequado segundo a norma.

Metodologia

Diante do exposto, para realizar os cálculos previsionais e os experimentos das posições do material de absorção sonora, é necessário um ambiente que permita realizar alterações, o qual encontra-se no prédio de Engenharia Mecânica, no Campus II da UFG, especificamente no Laboratório de Mecânica Aplicada – LabMEC.

Baseado na ISO 3382-1 foram selecionados 4 pontos distintos para a fonte (F1, F2, F3 e F4) e 4 pontos para o receptor (R1, R2, R3 e R4), sendo que o posicionamento foi determinado aleatoriamente.

A fonte sonora omnidirecional foi programada para gerar ruído a 100 dB de intensidade sonora. O sonômetro permite obter o tempo de reverberação de três maneiras diferentes, as quais são conhecidas por T_{20} , T_{30} e EDT. Os descritores T_{20} e T_{30} são geralmente chamados de “tempos de reverberação tardia”, pois medem na parte posterior da curva de decaimento. O EDT é chamado de “reverberação inicial” e considera-se que reflete melhor como as pessoas percebem a reverberação.

A sala foi testada com nenhuma, uma e duas espumas acústicas, sendo do leiaute 1 ao 4 com uma espuma, e do leiaute 5 ao 10 com duas espumas, sempre com posições diferentes a fim de encontrar o máximo de dados possíveis. Cada rolo de espuma possui dimensões (500 x 190 x 5 cm).

Resultados e discussão

Considerando os dados das espumas acústicas utilizadas (coeficiente de absorção $\alpha = 0,85$ para 500 Hz), encontra-se o tempo de reverberação provisional.

Para a sala com uma espuma, o menor desvio padrão encontrado em EDT é do leiaute 3, pois ele afeta diretamente os dois últimos pontos de medição (F4R3 e F4R4), que são os pontos mais próximos, deixando a sala mais homogênea no quesito percepção sonora. Também foi no leiaute 3 que pôde se observar maior flutuação nos valores de T_{20} e T_{30} , possivelmente causada pela influência dos mesmo dois últimos pontos. Foi notada redução no tempo de reverberação, no entanto o valor permaneceu acima do recomendado na NBR 12179:1992, de 0,55 s.

Quanto ao uso de duas espumas acústicas, verifica-se elevada redução em relação à sala sem nenhum tratamento acústico e considerável redução em relação à sala com uma espuma. Mas, ainda assim, permanece acima do tempo objetivo da norma.

Para o T_{20} , o leiaute mais homogêneo foi o leiaute 9 e para o T_{30} foi o leiaute 8, mas para essas duas propostas houve pouca variação. Por sua vez, para EDT o leiaute 5 foi o mais homogêneo, proporcionando a mesma qualidade acústica em maior parte da sala.

Tabela 1 - Resumo dos valores calculados e do experimento(s)

	Sem espuma	Uma espuma	Duas espumas
SABINE	4,35	1,52	1,02
EYRING	4,29	1,46	0,96
MILLINGTON	4,26	1,38	0,80
FITZROY	4,59	2,67	2,48
ARAU-PUCHADES	4,43	1,92	1,40
KUTTRUFF	4,31	1,48	0,98
EXPERIMENTO	5,19	1,98	1,51

Fonte: Elaboração própria.

Analisando a Tabela 1, onde estão todos os valores dos cálculos previsionais em 500 Hz, e a média dos experimentos, podemos notar que quando não há nenhum tratamento acústico na sala o valor do experimento é bem maior que os dados calculados. A partir do momento em que é inserida a espuma acústica, os valores já se aproximam, ou seja, a fórmula desenvolvida por Arau- Puchades é mais precisa que as demais, pois seus valores são os que mais se aproximam do teste experimental.

Conclusões

Após realizar o estudo de campo sonoro em salas, percebe-se que ele depende da fonte, meio de propagação e receptor.

Ao comparar os valores encontrados no experimento com os valores dos dados previsionais, nota-se que para a sala sem nenhum tratamento acústico todos os valores calculados foram menores que os experimentos, mas bem próximos. Quando se utiliza uma ou duas espumas acústicas os valores calculados já começam a flutuar, mostrando que um ou outro método passa a ser mais preciso. Após analisar todos os dados, notou-se que a fórmula de Arau-Puchades possui valores mais próximos dos encontrados experimentalmente.

Ao realizar os cálculos previsionais, analisando as fórmulas, observa-se que em geral elas não analisam o posicionamento do tratamento acústico, apenas tiram uma média do coeficiente de absorção geral e dividem pela área, se tornando não tão precisos quando a sala não é homogênea acusticamente. Logo, com a aquisição do material de absorção é importante saber os pontos que possuem maior flutuação na reverberação, propondo o melhor arranjo para deixar o ambiente desejado o mais homogêneo possível, deixando de prejudicar certas áreas e trazendo conforto acústico para toda a sala. Assim os cálculos previsionais se tornam mais precisos e aplicáveis para situações gerais.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. , *Tratamento acústico em recintos fechados*: NBR 12179, Rio de Janeiro, 1992.

BRANDÃO, E. *Acústica de Salas: Projeto e modelagem*. São Paulo: Blucher, 2016.

GERGES, S. N. Y. *Ruído: Fundamentos e Controle*. 2 ed. Florianópolis: NR Editora, 2000.

HERRMANN, J. O. *Medições e simulações de índice de transmissão de fala (STI), definição (D_{50}) e tempo de reverberação (TR) em salas de aula*. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba; 2018.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *Acoustics – Measurement of room acoustic parameters. Part 2: Reverberation times in ordinary rooms*: ISO 3382-2:2008, 2008.

ROCHA, S. P. F. *Influência do tempo de reverberação no isolamento sonoro entre espaços*. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Portugal; 2014.

MODELAGEM EXPERIMENTAL DO ARRANJO PARIETAL UTILIZANDO TECIDO NÃO BIOLÓGICO

Anderson Gomes Girardi,¹ Sigeo Kitatani Jr,² Renato Miranda de Melo³

Introdução

Desde o início dos estudos sobre anatomia e comportamento biomecânicos de tecidos humanos, é muito comum utilizar cadáveres ou mesmo animais como cobaias. Entretanto, em algumas situações é possível fazer simulações de comportamento de tecidos biológicos humanos, quando o foco é o comportamento mecânico da anatomia humana.

No tratamento pós cirúrgico de pacientes que foram submetidos a cirurgias abdominais que exigem a necessidade de incisão da estrutura multiplanar, é muito comum a incidência de hérnias incisionais, o que provoca a necessidade de reoperar esses pacientes, tornando o tratamento muito mais complexos e ocasionando traumas adicionais e, conseqüentemente, interferindo na qualidade de vida do paciente.

Isto acontece pois o estrato muscular aponeurótico do abdômen tem papel importante na estabilização mecânica, a partir da contração da estrutura muscular multiplanar do abdômen, o que implica em sollicitação mecânica na região mediana fragilizada – a região suturada nas cirurgias que necessitam de acesso à cavidade peritoneal.

1 Universidade Federal de Goiás – andersongomes@ufg.br.

2 Universidade Federal de Goiás – sigeojr@ufg.br.

3 Universidade Federal de Goiás – renato_melo@ufg.br.

Neste trabalho será apresentada a modelagem do abdômen humano a partir de tecido não biológico, com a finalidade de se estudar a resistência mecânica da estrutura multiplanar abdominal humana, com o intuito de avaliar a técnica denominada de “TSH - transposição do saco herniário” (Melo, 2020) – em comparação com a técnica padrão de sutura do tecido aponeurótico.

Este estudo clínico indica que a técnica proposta inicialmente por Lázaro da Silva (1971) promove uma cicatrização mais robusta do tecido lesionado, bem como tem como consequência a diminuição da taxa média de recidiva, da ordem de 8%.

Além das consequências biológicas oriundas da escolha pela técnica de Lázaro da Silva (1971), este estudo pretende analisar as consequências do ponto de vista mecânico do uso desta técnica.

Metodologia

No estudo aqui apresentado é proposta a criação de um aparato experimental com o intuito de se analisar, do ponto de vista de resistência dos materiais, a resistência mecânica de uma estrutura multiplanar que represente os tecidos musculares presentes na região abdominal humana após terem sofrido incisão e sutura em cirurgias em que é necessário o acesso à cavidade peritoneal.

Para simular adequadamente o comportamento mecânico dos músculos na região abdominal, é necessário, além de reconstituir em laboratório uma estrutura multicamadas com tecido não biológico (uma vez que se pretende analisar apenas os aspectos mecânicos) a fim de representar a anatomia humana nesta região do corpo humano, submeter estes tecidos às condições de contorno adequadas, de modo a representarem a realidade a que os músculos biológicos são submetidos.

Para garantir que os resultados obtidos estejam relacionados com as condições definidas em bancada, a fim de se minimizar a aleatoriedade, o aparato deve ser construído de forma que se consiga aplicar e controlar as condições de contorno adequadas, bem como medir os efeitos consequentes da aplicação destes esforços com precisão satisfatória.

Além disso, repetições devem ser feitas, de forma que se possa fazer uma análise estatística dos resultados baseada em análise de variância (Montgomery, 2012), obtendo-se, então, conclusões a respeito dos diferentes arranjos da estrutura aponeurótica (de acordo com a técnica cirúrgica escolhida) e, portanto, sobre a resistência mecânica resultante desses arranjos.

Resultado e discussão

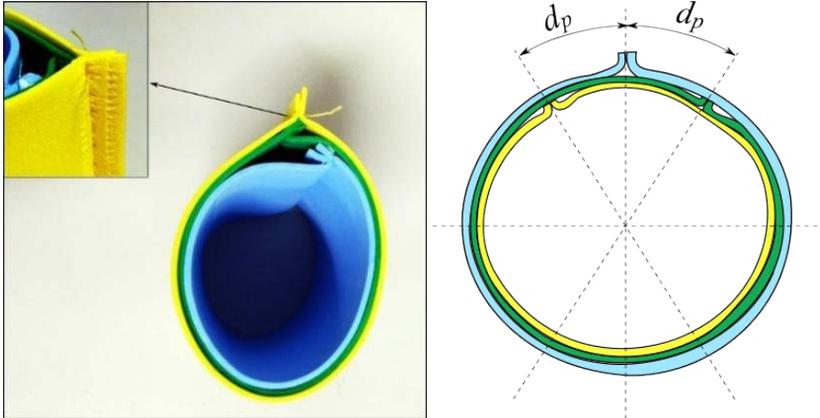
Após a análise de alguns tipos de materiais, foram escolhidas para representar os tecidos musculares da região abdominal lâminas de acetato de etileno-vinil (*ethylene-vinyl acetate*, EVA). Além de fáceis de encontrar, possuem comportamento viscoelástico, da mesma forma que os tecidos humanos. Entretanto, diferem do tecido humano, uma vez que os não biológicos não possuem as mesmas características de regeneração, além do fato de que os tecidos biológicos são heterogêneos.

As lâminas de EVA são cortadas e costuradas com auxílio de gabaritos, no intuito de minimizar erros aleatórios na medição de rigidez, e são montadas concêntricamente para a constituição dos corpos de prova a serem submetidos a esforços em ensaio de laboratório, conforme ilustrado na Figura 1.

Após ensaios mecânicos de tração, foi possível identificar que, em função do processo de fabricação e dos produtos químicos utilizados, as lâminas de EVA variam sua resistência mecânica e espessura de acordo com o lote e cor. Sendo assim, foi escolhida uma única cor de lâminas de EVA.

Os corpos de prova montados com as três camadas de EVA são submetidos à pressão interna para simulação dos esforços presentes na região abdominal humana, utilizando-se, para isso, duas configurações: com suturas coincidentes, representando a configuração padrão, e com costura defasadas angularmente, representando a configuração proposta na técnica TSH, de Lázaro da Silva (1971), conforme ilustrado a Figura 1b.

Figura 1 - (a) Corpos de prova para simulação da estrutura aponeurótica - Configuração usual; (b) Com suturas conforme proposta pela técnica de Lázaro da Silva (1971)



Fonte: Elaboração própria.

A pressão é aplicada de forma quase estática, com vazão constante, a partir de um reservatório com pressão nominal mínima 100 vezes superior à pressão de ruptura dos corpos de prova, fazendo com que o corpo de prova se comporte como um vaso de pressão de parede fina (Gere, 2003; Beer; Johnston, 2010; Hibbeler, 2010). Um sistema de medição de pressão utilizando microcontrolador Arduino, um módulo de alimentação do sensor e de condicionamento de 24 bits de resolução, HX711 e um sensor de pressão piezo resistivo modelo MPS20N0040D-S são utilizados no presente trabalho.

Após a montagem do aparato experimental e a realização de testes para fins de avaliação da capacidade de correlacionar o nível de defasagem entre as suturas na amostra e a sua resistência mecânica, pôde-se medir a resistência, de forma indireta e comparativa, avaliando os valores de pressão de ruptura do corpo de prova, que é constituído pelas três camadas de tecido EVA. A Tabela 1 mostra os resultados obtidos para nove repetições de cada configuração de teste, sem defasagem entre as suturas (vide Figura 1a), ou seja, para a configuração mais usual de sutura e para a técnica de Lázaro da Silva, com defasagem ao longo do perímetro do corpo de prova, para dois níveis da defasagem dp .

Tabela 1 - Resultado dos ensaios para diferentes configurações

	Pressão de ruptura (mmHg)		
	(dp = 0 mm)	(dp = 10 mm)	(dp = 20 mm)
Média Aritmética	107,44	168,37	213,61
Desvio Padrão	76,38	93,53	129,61

Fonte: Elaboração própria.

Conclusões

A análise de incerteza indica que o sistema de medição é capaz de gerar resultados confiáveis, com precisão muitas vezes (maior que 100) menor que a variância nas medidas de pressão de ruptura das amostras. A partir dos resultados obtidos foi possível demonstrar que, de acordo com a escolha do arranjo de costuras em três cilindros de tecidos concêntricos submetidos à pressão interna, é possível verificar, de forma comparativa, que a resistência mecânica da estrutura mecânica resultante se altera de acordo com o arranjo e de acordo com a variação da defasagem entre as suturas. Outros ensaios são necessários para a conclusão sobre os ganhos mecânicos com a utilização do arranjo de sutura proposto por Lázaro da Silva (1971).

Referências

- BEER, F. P.; JOHNSTON-JUNIOR, E. R. *Resistência dos Materiais*. 3. ed. São Paulo: Makron Books, 2010.
- GERE, J. M. *Mecânica dos Materiais*. 5. ed. São Paulo: Thomson Learning Ltda, 2003.
- HIBBELER, R. C. *Resistência dos Materiais*. 7 ed. São Paulo: Pearson, 2010
- LÁZARO DA SILVA, A. Plástica com o saco herniário na correção das hérnias incisionais. *O Hospital*; v. 79, p. 123-134. 1971
- MELO, R. M.; NEVES, R. A; MENEZES, L. B. Tracking stem cells in the hernial sac: a gaze beyond pure tissue repair. *Revista do Colégio Brasileiro de Cirurgiões*, 47. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/0100-6991e-20202636>.
- MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. *Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros*. 5. ed. Rio de Janeiro: Editora Livros Técnicos e Científicos, 2012.

ESTUDO DA ADEQUAÇÃO DE UMA MÁQUINA DE MANUFATURA PARA REDE DE COMUNICAÇÃO ETHERNET

Maria Clara de Oliveira,¹ Lays Barbosa de Souza,² Daniel Fernandes da Cunha,³
João Paulo da Silva Fonseca⁴

Introdução

Após avanços na tecnologia de informação, os novos meios de comunicação estão cada vez mais presentes nos processos industriais. A introdução à interface máquina-homem tem impulsionado avanços na produção. Dito isso, a interconectividade e a comunicação entre os sistemas têm impulsionado o início da quarta revolução industrial (Deloitte, 2015).

Nesse viés, surgem os chamados SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), também conhecidos como Controles de Supervisão e Aquisição de Dados, que possibilitam o acompanhamento em etapas da linha de produção por interfaces gráficas em computadores localizados em uma central de controle industrial (Ferraz, 2002).

Tais sistemas já são realidade em indústrias. As máquinas- ferramentas a Comando Numérico Computadorizado (CNC) possibilitam uma interconectividade na rede devido à existência de controladores de arquitetura

1 Universidade Federal de Goiás – clara_maria@discente.ufg.br.

2 Universidade Federal de Goiás – laysbds@gmail.com.

3 Universidade Federal de Goiás – danielcunha@ufg.br.

4 Universidade Federal de Goiás – jpsfonseca@ufg.br.

tura aberta em seu mecanismo interno, ou seja, dispositivos de interfaces abertas para comunicação (Del Conte, 2007).

Assim sendo, este projeto visa à adequação de uma máquina- ferramenta à rede de comunicação Ethernet, o Centro de Usinagem ROMI D600 com controlador Siemens Sinumerik 828D embarcado, disponível no Laboratório de Materiais e Fabricação (LAMAF) da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação da Universidade Federal de Goiás.

Metodologia

O trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Materiais e Fabricação do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Goiás, tendo como objeto de estudo o Centro de Usinagem ROMI D600 equipado com a PPU do controlador Siemens Sinumerik 828D versão 4.4.

A arquitetura de rede corporativa foi implementada para adequação do Centro de Usinagem à rede Ethernet, disponibilizando-o para comunicação e troca de dados com outros dispositivos, tem como base a utilização das propriedades do protocolo TCP/IP, cabos de rede com conector RJ45 e computadores pessoais conectados à rede disponível.

Para a conexão, compartilhou-se uma pasta na rede corporativa a fim de que a máquina e o computador pudessem trocar documentos entre si. O principal objetivo é coletar dados obtidos a partir da Função *Trace*. É importante ressaltar que mesmo sem o compartilhamento da pasta é possível controlar remotamente através do UltraVNC Viewer.

A arquitetura se fundamenta na adequação e configuração do ROMI D600 para conectividade na rede, comunicação entre PC e controlador por meio do acesso remoto, aquisição de dados da máquina e, por fim, o monitoramento das variáveis de processo.

Resultados e discussão

Após a implementação da arquitetura na rede corporativa do LAMAF, o operador pode acessar remotamente o Centro de Usinagem ROMI D600, fazendo o acompanhamento do processo de usinagem em tempo real.

Atualmente, existe um computador conectado à rede. Contudo, pode-se utilizar até sete computadores de comunicação que possuam o *software* UltraVNC Viewer e uma pasta de compartilhamento na rede Ethernet que permita o armazenamento e compartilhamento de arquivos.

Existem algumas medidas de segurança implementadas pelo fabricante que limitam a interconectividade, como a restrição da simultaneidade de acesso remoto ao controlador. Além disso, existe uma quantidade fixa de drivers para comunicações na CNC, outro fator é a interface disponível ao acesso remoto estar presente apenas no painel de exibição do Sinumerk 828 D.

Outro impasse é o tempo de conexão do *software* UltraVNC Viewer, que após alguns minutos de inatividade cessa a comunicação com a máquina, fazendo necessária uma nova ativação.

A comunicação de dados acontece pelas pastas conectadas à rede. Na interface, essas pastas podem ser visualizadas na HMI da máquina através do *Program Manager*. No entanto, alguns dispositivos eletrônicos não se tornaram visíveis para o compartilhamento de dados, após muita insistência, os mesmos não ficam disponíveis na *soft key* criada.

Os resultados obtidos do experimento realizado para análise do comportamento das variáveis de processo através da função *Trace* foram registros gráficos que demonstram a variação temporal da potência ativa e da posição da base de apoio durante o processo de usinagem de dois materiais distintos: uma peça de alumínio e outra de ferro fundido.

A partir da análise dos diagramas obtidos, pode-se deduzir que a variação da potência ativa do fuso está diretamente ligada às características do material usinado. Esses resultados estão de acordo com os reportados por Souza (2019).

Conclusões

Após as devidas configurações na máquina e no computador obteve-se sucesso nas comunicações e compartilhamento. O controle, a distância e a visualização das etapas do processo produtivos foram possíveis com a adequação a uma rede corporativa para a intercomunicação via Ethernet com o protocolo TCP/IP.

Contudo, ainda restam impasses a serem solucionados, como a análise quantitativa e qualitativa das variáveis obtidas pela função *Trace* e a dificuldade na conexão de alguns dispositivos eletrônicos nos quais não foi possível o compartilhamento de dados.

Referências

DEL CONTE, E. G. *Desenvolvimento de um sistema para monitoramento de dados em HSM (High Speed Machining)*. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Faculdade de Engenharia, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara d'Oeste, 2007.

DELOITTE. *Industry 4.0: an introduction*. Holanda, 2015. Disponível em: https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/be/Documents/Operations/2015_Industry%204%200%20Report%20vFinal.pdf. Acesso em: 27 abr. 2022.

FERRAZ, F. J. *Desenvolvimento de um sistema de monitoramento e supervisão para o processo de torneamento*. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2002.

SOUZA, L. B. *Estudo da adequação de uma máquina de manufatura para rede de comunicação Ethernet*. 2019. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Goiás, 2019.

ATIVIDADES EXPERIMENTAIS DA INFLUÊNCIA DO GÁS DE PROTEÇÃO NA SEGUNDA CAMADA DE REVESTIMENTO DE LIGA DE NÍQUEL (INCONEL 625) EM SUBSTRATO DE AÇO CARBONO DEPOSITADAS PELO PROCESSO GMAW

Ayrton Trajano de Oliveira,¹ Demostenes Ferreira Filho²

Introdução

A resistência à corrosão tem feito do Inconel 625 um material altamente utilizado em meios corrosivos severos. Entre suas recomendações está a construção de tanques de armazenamento de resíduos químicos, como ácido clorídrico e ácido nítrico. Em geral esses ácidos apresentam problemas diferentes de corrosão, logo, um material que geralmente resiste a um deles costuma ser atacado pelo outro (Special Metals, 2000).

Para o revestimento, usa-se o processo de soldagem. Em geral, este recobrimento é feito por etapas comuns de soldagens como MIG/MAG, arame tubular, arco submerso e plasma (Magalhães, 2008). Durante a pesquisa,

1 Universidade Federal de Goiás – ayrton.trajano@discente.ufg.br.

2 Universidade Federal de Goiás – demostenesferreira@ufg.br.

variamos parâmetros durante o processo de revestimento e observamos os diferentes resultados obtidos através de testes como o de microdureza.

Metodologia

O primeiro passo foi a confecção dos corpos de prova. O professor Demostenes Ferreira Filho, utilizando do robô industrial de alta precisão HP20D e o controlador DX100, ambos da fabricante Yaskawa, fabricou dois corpos de prova usando o procedimento de solda do tipo GMAW, o primeiro usando como gás de proteção a mistura de nome NAVY, com Argônio (Ar) e 25% de Hélio (He), já o segundo foi fabricado usando o gás TUB, formado de Argônio (Ar) e 25% de Dióxido de Carbono (CO₂). Durante a confecção dos corpos de prova, parâmetros para a soldagem e produção do revestimento, processo também chamado de amanteigamento, foram definidos para a distância de bico contato-peça (DBCP), velocidade de soldagem (Vsol), velocidade de alimentação (Valim), Vazão e Voltagem (U). Os valores estão contidos na Tabela 1 a seguir:

Tabela 1 - Parâmetros de soldagem

DBCP	17 mm
Vsol	25 cm/min
Valim	10 m/min
Vazão	16 L/min
U	25 V

Fonte: Elaboração própria.

Os corpos de prova em tamanhos menores foram levados para o ensaio de dureza Vickers.

Para a análise dos corpos de prova foi usado o durômetro HM- 200 da fabricante Mitutoyo, e feitas 35 medidas diferentes para cada material. Depois, com os resultados obtidos, tabelas foram organizadas para poder, assim, chegar a uma conclusão melhor.

Resultados e discussão

Os resultados obtidos estão apresentados nas Tabelas 2 e 3:

Tabela 2 - Dureza para solda com He

	10,0 mm	8,0 mm	6,0 mm	4,0 mm	2,0 mm
3,5 mm	228,9	245,2	205,2	206,9	215,1
6,0 mm	228,0	204,0	201,4	217,4	192,7
8,5 mm	246,0	203,3	240,9	227,6	219,8
11,0 mm	366,6	194,3	333,5	293,3	363,7
13,5 mm	343,1	406,0	340,4	293,0	315,8
16,0 mm	363,0	357,9	380,5	325,8	435,1
18,5 mm	335,1	352,3	387,9	345,0	327,3

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 3 - Dureza para solda com CO₂

	10,0 mm	8,0 mm	6,0 mm	4,0 mm	2,0 mm
3,5 mm	205,9	189,7	214,1	180,8	192,3
6,0 mm	189,6	195,2	218,8	171,5	188
8,5 mm	247,8	216,4	203,2	205,0	185,6
11,0 mm	348,2	232,5	255,1	212,8	214,6
13,5 mm	409,2	410,3	377,1	339,5	305,8
16,0 mm	394,4	391,7	385,6	325,0	339,2
18,5 mm	410,7	388,7	320,8	322,2	312,8

Fonte: Elaboração própria.

Para uma melhor análise, remove-se os valores extremos e calcula-se a média da dureza para cada distância da base. Assim, obtém-se os dados constantes da Tabela 4, cujos valores estão em HV.

Tabela 4 - Médias das durezas

	He		CO ₂	
	Média	Des. Pad.	Média	Des. Pad.
3,5 mm	217,0	11,1	196,0	8,7
6,0 mm	207,6	8,6	190,9	3,8
8,5 mm	229,4	10,7	208,2	7,2
11,0 mm	330,2	35,3	234,1	20,3
13,5 mm	333,1	15,0	375,3	34,9
16,0 mm	367,1	11,9	372,2	28,7
18,5 mm	344,1	8,6	343,9	38,8

Fonte: Elaboração própria.

Conclusões

A diferença de dureza na região da camada do segundo cordão de solda é provavelmente decorrente da influência dos gases de proteção no momento de solda. Uma possibilidade para contornar isso seria a disponibilidade de carbono através do CO₂ decomposto no momento da solda, favorecendo o endurecimento da estrutura.

Mais análises devem ser feitas para confirmar as hipóteses aqui citadas. Para isso, pretende-se fazer um ataque com ácido, ressaltando as estruturas das amostras para, em seguida, levá-las a um microscópio para a análise do processo que ocorreu e gerou tais valores.

Referências

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Specification for Wellhead and Christmas Tree Equipment: ANSI/API SPEC 6A, 19. ed, p. 54-57, July 2004.

CALLISTER, W. D. *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

CARDOSO, R. L.; PRADO, E. M.; OKIMOTO, P. C.; PAREDES, R. S. C.; PROCOPIAK, L. A. Avaliação da Influência de Gases Proteção Contendo Diferentes Teores de CO₂ nas Características dos Revestimentos Soldados Visando o Reparo

de Turbinas Erodidas por Cavitação. *Soldagem & Inspeção*, ano 8, n. 2, p. 68-74, 2003.

MAGALHÃES, S. G. *Avaliação do revestimento a base de liga de níquel em aço estrutural, empregando o metal de adição ERNiCrMo-3 através da soldagem MIG/MAG*. 2008. 97 f. Dissertação (Mestrado em Ciência de Materiais) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/16195>. Acesso em: 28 abr. 2022.

PESSOA, A. R. P. *Revestimento de Ligas de Níquel pelo Processo MIG/MAG com Transferência por Curtocircuito*. 2009. 127 f. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.

SPECIAL METALS. *Inconel alloy 625*. 2013. Disponível em: <https://www.specialmetals.com/documents/technical-bulletins/inconel/inconel-alloy-625.pdf>. Acesso em: 28 abr. 2022.

APLICAÇÃO DO PROCESSO MADA COM LIGAS DE COBALTO

Lúcio Mateus Santana Carvalho¹; Demostenes Ferreira Filho²

Introdução

De acordo com ESAB (2005), dentre os processos de soldagem existentes, o que utiliza arco elétrico com gás de proteção (GMAW) é um dos que apresentam maior produtividade, flexibilidade e facilidade de operação. Ademais, segundo Liu *et al.* (2020), a manufatura aditiva por deposição a arco (MADA), utiliza de processos de soldagem para a criação de diversos objetos e peças por meio de transferências metálicas. A MADA é a preferida das indústrias por moldar uma variedade de materiais metálicos, ter alta eficiência de deposição e por possibilitar a construção de estruturas complexas.

Segundo Li *et al.* (2019), as ligas Stellite (de cobalto) possuem excelente resistência ao desgaste, à corrosão e à oxidação, além de reterem essas propriedades mesmo em altas temperaturas. Elas são utilizadas em condições extremamente corrosivas e de desgaste, como em motores aeronáuticos, turbinas industriais a gás e em indústrias nucleares. Além destas aplicações, as ligas de cobalto, aliadas à manufatura aditiva, são utilizadas para a fabricação de próteses, hélices, na indústria armamentista, dentre outras. O objetivo deste trabalho é reunir diversas referências bibliográficas que validam toda a parte de união entre o GMAW com a MADA utilizando

1 Universidade Federal de Goiás – luciocarvalho@discente.ufg.br.

2 Universidade Federal de Goiás – demostenesferreira@ufg.br.

ligas de Cobalto (Stellite). Tendo reunido tudo, estudaremos a construção e propriedades de objetos e peças construídos com ligas de Cobalto (Stellite) a partir da MADA, utilizando o processo GMAW.

Metodologia

A pesquisa bibliográfica foi feita em cima de diversos artigos utilizando as seguintes palavras chaves: GMAW; MIG; MAG; Ligas de Cobalto; Stellite; Stellite 21; MADA; WAAM. Os artigos foram encontrados nos periódicos da capes, ScienceDirect, TUDelft e MDPI.

Discussão

Atualmente, o trabalho está em etapa de pesquisa bibliográfica e construção do relatório descritivo dos processos, materiais e métodos. Até o momento foram trabalhados os processos de soldagem GMAW, a manufatura aditiva MADA e o uso da liga de cobalto Stellite 6 e Stellite 21 na MADA. No Quadro 1 estão descritos os parâmetros de soldagem que serão considerados e suas influências:

Quadro 1 - Influência dos parâmetros de soldagem

Parâmetro de Soldagem	Influência
Velocidade de alimentação (ou taxa de deposição)	A velocidade de alimentação é a taxa de metal de solda que será depositado no metal de base em uma hora de arco elétrico aberto. O principal fator que faz variar essa velocidade é a corrente de soldagem, que é a amperagem que a fonte envia para a realização da solda, além da extensão do eletrodo.
Distância de bico de contato - peça	É a distância da extremidade do bico de contato com a peça. Nesse espaço que acontece o efeito joule (geração de calor pela corrente). Essa distância afeta a corrente de soldagem que será necessária para fundir o arame no metal, a uma velocidade de alimentação do mesmo. Quando essa distância aumenta, o aquecimento também aumenta e a corrente de soldagem necessária para fundir esse arame diminui.

Parâmetro de Soldagem	Influência
Tensão de soldagem	A tensão de soldagem é quem vai definir o comprimento do arco-elétrico. Dependendo da escolha dela, o arco vai ser mais ou menos estável aos níveis de corrente. A depender do tipo de transferência metálica essa tensão será alta ou baixa, sendo esse valor controlado diretamente na máquina pelo controlador.
Indutância	A indutância influencia no tempo que a corrente leva para atingir seu valor máximo. Esse atraso é o responsável pelo tempo de arco “ativo”, um aumento na indutância também aumenta esse tempo, trazendo mais fluidez na poça de solda, mais facilidade na solda e menos respingos, porém um pouco menos de penetração na solda. Quando excessiva, resultará numa partida errada.
Velocidade de soldagem (ou velocidade de deposição)	A velocidade de soldagem consiste na relação entre o caminho percorrido pelo arco-elétrico no metal de base e o tempo gastos para percorrer ele. Alguns fatores que demandam uma maior ou menor velocidade são a espessura da peça e o tipo de junta. Essa velocidade, juntamente com a tensão de soldagem, é que vai ditar a amperagem empregada.
Técnicas de soldagem	Algumas técnicas de soldagem afetam diretamente as características da solda. A principal delas é a posição da tocha soldagem, que, quando na horizontal, pode ser empurrando ou puxando a tocha e quando na vertical o sentido da soldagem pode ser ascendente ou descendente. Dependendo da escolha você pode ter um arco mais estável e menos respingos na peça.

Fonte: ESAB (2005).

A Tabela 1 demonstra os valores de alguns dos parâmetros descritos no Quadro 1, os quais diversos autores utilizaram experimentalmente. Os experimentos utilizaram a MADA e o processo GMAW para estudar a manufatura aditiva com ligas de Cobalto tanto Stellite 6 quanto Stellite 21.

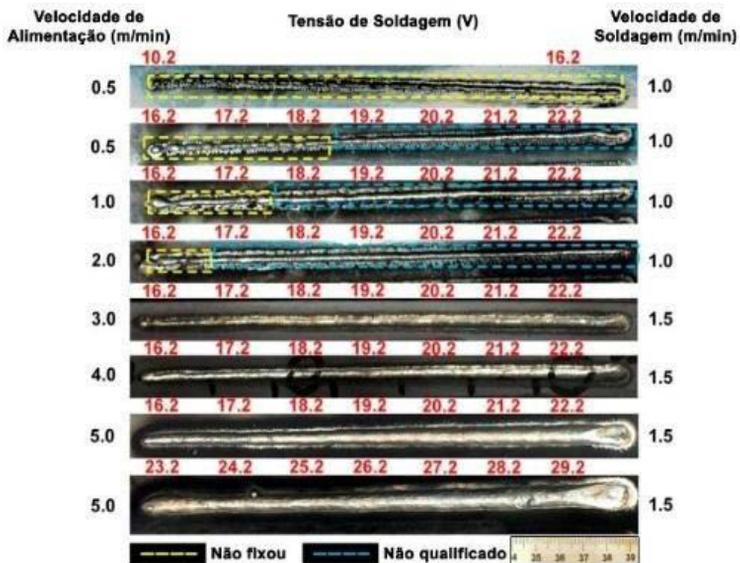
A Figura 1 complementa a Tabela 1, mostrando as características da solda pela variação de alguns parâmetros. Os valores escolhidos para os parâmetros de Stellite 6 podem ser os mesmos para Stellite 21, sendo o contrário também válido.

Tabela 1 - Parâmetros utilizados em experimentos envolvendo MADA, GMAW e ligas de cobalto

Autor	LI et. al. (2019)	LIN (2019)						RAJIEEV et. al. (2020)	SILVA et. al. (2019)		CABRAL et. al. (2018)
Arame	Stellite 6	Stellite 6						Stellite 6	Stellite 21 (com metal de enchimento Stellite 6)	Stellite 6 (com metal de enchimento Stellite 21)	Stellite 21
Corrente do Arco (A)	200	180						131	—		—
Tensão de Soldagem (V)	—	10,2 até 22,2	16,2 até 22,2	16,2 até 22,2	16,2 até 22,2	16,2 até 22,2	16,2 até 29,2	11,1	23	34	
Velocidade de Alimentação (m/min)	1	0,5	1	2	3	4	5	4,5	7,5	8	
Velocidade de Soldagem (m/min)	—	1	1	1	1,5	1,5	1,5	0,127	0,6	0,3	
Gás de Proteção	Argônio (Ar 99,99%)	Alumax (70% Ar + 30% He)						98% Ar + 2% CO ₂	98% Ar + 2% O ₂	98% Ar + 2% O ₂	
Fluxo do gás (L/min)	—	18						17	14	15	

Fonte: Elaboração própria.

Figura 1 - Soldas com arames de Stellite 6 de acordo com a variação de alguns parâmetros



Fonte: Adaptado de Lin (2019).

Conclusões

As ligas de cobalto demonstram grande potencial para sua aplicação em um processo MADA, por todos os motivos descritos anteriormente e, principalmente, devido às suas propriedades. Os valores dos parâmetros mais indicados para se soldar com essas ligas, segundo a literatura, são: Tensão entre 20V a 30V; Vel. de alimentação entre 4 e 7,5 (m/min); Vel. de soldagem entre 0,5 e 1,5 (m/min); Gás de proteção (98% Ar + 2% O₂) ou Alumax; Vazão do gás entre 15 e 20 (L/min).

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Programa de Educação Tutorial (PET), ao Ministério da Educação (MEC) e ao FNDE pelo apoio financeiro.

Referências

ESAB BRASIL. *Soldagem MIG/MAG*. [S.l.]: ESAB Br, 2005. *E-book*. Disponível em: <https://www2.uuff.br/profab//files/2016/09/ESAB-Apostila-MIG-MAG.pdf>. Acesso em: 18 out. 2021.

LI, Z.; CUI, Y.; WANG, J.; LIU, C.; WANG, J.; XU, T.; LU, T.; ZHANG, H.; LU, J.; MA, S.; FAN, H.; TANG, S. Characterization of Microstructure and Mechanical Properties of Stellite 6 Part Fabricated by Wire Arc Additive Manufacturing. *Metals*, v. 9, n. 4, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/met9040474>.

LIU, J.; XU, Y.; GE, Y.; HOU, Z.; CHEN, S. Wire and arc additive manufacturing of metal components: a review of recent research developments. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 111, n. 1-2, p. 149-198, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05966-8>.

IMPLEMENTAÇÃO DA TÉCNICA DE MANUFATURA ADITIVA PELO PROCESSO GMAW COM ARAME FRIO

Rafael Gonçalves Vieira,¹ Demóstenes Ferreira²

Introdução

Os processos convencionais de fabricação têm bastante relevância para a indústria e sociedade atual, pois, por meio deles, produtos essenciais foram desenvolvidos e fabricados. Entretanto, com o surgimento da Indústria 4.0, ou quarta revolução industrial, verificou-se a necessidade da automatização e criação de novos processos produtivos, capazes de produzir peças mais complexas de forma mais inteligente. Nesse sentido, os processos de manufatura aditiva (popularmente conhecidas como impressão 3D) surgem como uma alternativa para potencializar esse novo sistema industrial, devido à sua capacidade de produzir peças de formas complexas com pouco ou nenhum desperdício de material, além de sua alta liberdade e flexibilidade nos projetos, configurando-se como um dos pilares tecnológicos da indústria 4.0 conforme concluído por Falcão (2019).

A manufatura aditiva vem ganhando grande espaço nas indústrias em geral, com destaque para automobilística, biomédica, aeroespacial, arquitetônica e arte estética, conforme reportado por Liu *et al.* (2020).

1 Universidade Federal de Goiás – rafael_goncalves@discente.ufg.br.

2 Universidade Federal de Goiás – demostenesferreira@ufg.br.

A impressão 3D de materiais poliméricos ganhou destaque no mercado de forma surpreendente. Atualmente, diversas empresas fazem o uso dessa tecnologia para alavancar sua produção, reduzindo consideravelmente o tempo de prototipagem e permitindo a otimização do ciclo de desenvolvimento de alguns modelos de produtos.

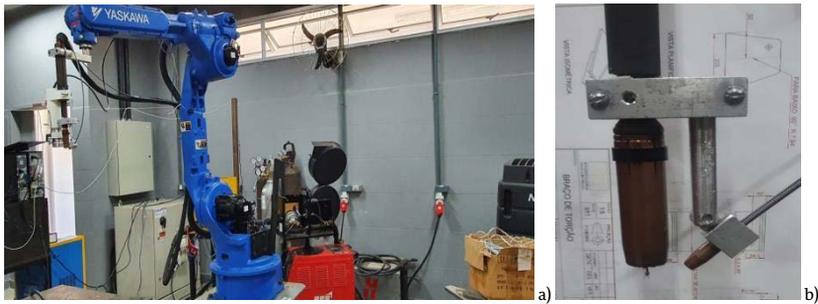
Ainda de acordo com Liu *et al.* (2020), para a manufatura aditiva de materiais metálicos, existem 4 tipos principais de processos, sendo eles: Powder bed fusion (PBF), Directed energy Deposition (DED), Binder jetting e sheet lamination, sendo que os principais são o PBF e o DED, os quais estão incluídos no padrão internacional ISO/ASTM 52900. O escopo desse trabalho se limitará a analisar o processo Manufatura Aditiva Por Soldagem a Arco (MASA) utilizando a soldagem à arco elétrico com gás de proteção (GMAW) com adição de arame frio, que faz parte dos processos de deposição direta de material DED. O processo MASA é semelhante ao processo de soldagem convencional e requer gás inerte para a proteção contra oxidação e para permitir a sobreposição dos filetes de solda. Esse processo possui alta razão de deposição e é de baixo custo, sendo muito visado pelas indústrias.

A soldagem com adição de arame frio (CW-GMAW) é caracterizada pela adição de um arame não energizado na poça de fusão de um processo GMAW convencional, onde o calor causado pelo arco elétrico do arame energizado é responsável pela fusão do novo arame adicionado. As vantagens da adição de arame frio podem ser encontradas no aumento da taxa de deposição do processo, no baixo custo de operação, se comparado com outros processos como, por exemplo, duplo arame, e possivelmente no aumento da dissipação de calor do filete soldado. Para Cabrala *et al.* (2018), uma das vantagens do processo CW-GMAW está na possibilidade de se usar arames com composições químicas diferentes, o que pode gerar uma melhoria metalúrgica, resultando, por exemplo, em um aumento de dureza e resistência mecânica. A análise do presente trabalho visa avaliar as influências do método em questão no tempo de resfriamento e nas propriedades físicas e mecânicas de sucessivos cordões realizados pelo processo MASA.

Metodologia

Para a execução de processo de soldagem normal do método GMAW utilizou-se uma fonte de soldagem multiprocesso a arco inteligente da marca IMC, modelo DIGPLUS A7. Para o controle da velocidade de soldagem, movimentação do bico de solda e outras necessidades do processo MASA foi usado um braço robótico Motoman Yaskawa HP20D e seu controlador DX100, mostrados na Figura 1a.

Figura 1 - a) Célula Robotizada; b) bico e aparato para adição do arame frio



Fonte: Elaboração própria.

O arame frio foi adicionado ao processo através de sistema fixado junto ao bico de soldagem (Figura 1b), e para a alimentação do arame utilizou-se um segundo alimentador separado. A velocidade escolhida para o arame foi de 3m/min e eletrodo ER70s-6 para ambos os arames. O controle da temperatura será feito com sensor de temperatura também desenvolvido na Escola de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Goiás.

Resultados e discussão

Até o presente momento, somente testes preliminares foram feitos, entretanto, resultados preliminares já foram capazes de esclarecer alguns fatores importantes para a operação e o uso do método CW-GMAW. O primeiro deles é o alinhamento entre o arame frio e o energizado, que deve ser o melhor possível para garantir que o arame frio seja inserido corretamente na poça de fusão e se funda por completo. A Figura 2a mostra

o resultado de um dos testes realizados onde o arame não se fundiu por completo, resultando em falhas no cordão de solda.

Outro problema encontrado foi a falta de fusão do arame frio no início e final do cordão de solda, o que pode ser resolvido alterando as configurações do sistema para que o arame frio pare de ser alimentado e somente em seguida o arco elétrico seja interrompido (Figura 2b).

Figura 2 - a) Cordão de solda com fusão incompleta do arame frio; b) Arame frio não fundido no final do cordão de solda



Fonte: Elaboração própria.

Conclusões

Com base nos aspectos analisados, pode-se concluir que o processo MASA com arame frio é passível de estudo, pois espera-se resultados satisfatórios com cordões capazes de serem usados e aplicados em ambientes industriais de alta produtividade.

Referências

CABRALA, T. D. S.; RODRIGUESA, L. A.; FILHOB, A. A. C.; BARBOSA, F. F. (2018). Análise da resistência à corrosão em revestimentos a base de cobalto depositadas pelo processo GMAW-CW. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CORROSÃO, 2018. *Anais* [...]. São Paulo: Associação Brasileira de corrosão, 2018.

FALCÃO, A. C. R. A. Sistematização dos Pilares da Indústria 4.0: uma análise utilizando revisão bibliográfica sistemática. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

LIU, J.; XU, Y.; GE, Y.; HOU, Z.; CHEN, S. Wire and arc additive manufacturing of metal components: a review of recent research developments. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 111, n. 1-2, p. 149-198, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05966-8>.

AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS E TRAJETÓRIAS DE APLICAÇÃO DO PROCESSO MASA EM UMA PEÇA DE AÇO AO CARBONO

Carlos Eduardo Santos Souza,¹ Demóstenes Ferreira Filho²;

Introdução

A manufatura aditiva (AM – Additive Manufacturing) é definida como um processo de fabricação que consiste na sobreposição de múltiplas camadas visando a formação/construção de um componente tridimensional (Alberti, 2015). O processo é caracterizado pela modelagem 3D da peça, onde o modelo é composto por várias camadas, fazendo com que, assim, a trajetória e a sequência de deposição sejam definidas. As camadas são confeccionadas por meio da deposição de camada a camada do material (geralmente por soldagem), a qual, por sua vez é controlada por mecanismos de movimentação.

De acordo com Zhang *et al.* (2020), a manufatura aditiva vem sendo considerada uma das tecnologias de produção em massa mais promissoras, evidenciando, assim, a relevância do trabalho a ser desenvolvido. Levando isso em consideração, e que o processo é feito em camadas, Michel *et al.* (2019) evidenciam que, anteriormente ao procedimento de fabricação, deve-se ter em mente os seguintes aspectos: o fatiamento, a segmentação, o planejamento de caminho, o zoneamento e o caminho da camada. Durante

1 Universidade Federal de Goiás – carloseduardosantos@discente.ufg.br.

2 Universidade Federal de Goiás – demostenesferreira@ufg.br.

a fabricação, as etapas que os autores destacam para obter a peça final são o fatiamento, a estratégia de construção, a máscara e o zoneamento 3D. É válido destacar, ainda, que a estratégia de construção é fragmentada na segmentação, no planejamento do caminho e no zoneamento.

Entende-se, portanto, que a pesquisa científica a ser desenvolvida tem grande importância no que tange a estudar, testar, desenvolver e melhorar estratégias de fabricação através da manufatura aditiva utilizando a soldagem, tendo em vista que fomentará o desenvolvimento do setor industrial e científico, dado que mesmo tendo um grande potencial de produção, o tema carece ainda de estudos que fortaleçam as técnicas de fabricação, desenvolvimento de procedimentos inovadores e aprimoração dos já existentes.

Fica evidente, assim, que a pesquisa visa avaliar a influência dos parâmetros e da trajetória de aplicação do processo de manufatura aditiva por soldagem a arco (MASA) na fabricação de peças de aço carbono, tanto em relação à qualidade quanto à microestrutura da peça fabricada. Para a validação e estudo, o objetivo é fabricar peças com pequenas dimensões e de aplicação industrial.

Metodologia

O trabalho está sendo realizado em primeira instância na construção da fundamentação metodológica, buscando na revisão bibliográfica acerca do assunto a base para execução do procedimento experimental.

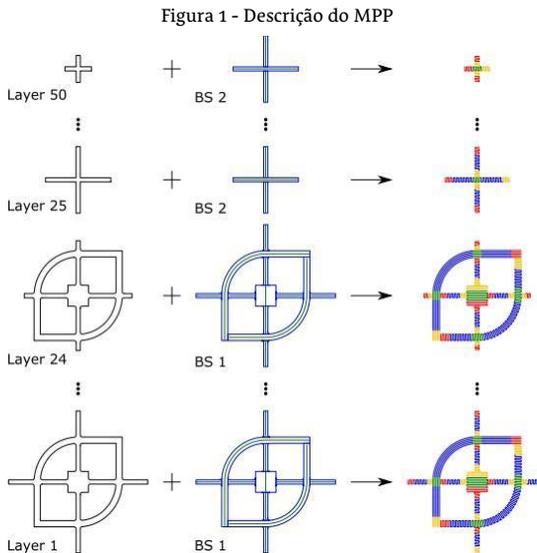
Resultados e discussão

Como o trabalho até então foi construído por meio de revisão bibliográfica, os resultados obtidos foram excepcionalmente relacionados a conhecimentos que irão pautar a execução experimental do projeto de pesquisa. Dessa forma, como o processo se baseia na deposição de camada a camada, a influência do planejamento do percurso durante a MASA foi estudada para o embasamento do modelo experimental.

Segundo Zhang *et al.* (2020), nos processos de manufatura aditiva a lei da tensão residual não depende do tipo da fonte de aquecimento, seja ela

arco, feixe de elétrons ou outros. Ainda, de acordo com Zhang *et al.* (2020), para a tensão residual com uma deposição única de camada, a estratégia que envolve todo o planejamento do caminho é um fator determinante na influência da taxa de resfriamento e do gradiente de temperatura. Zhang *et al.* (2020). evidencia que, conforme o número de camadas de deslocamento aumenta, a tensão residual de tração se torna menor. O método abordado por Zhang *et al.* (2020) produziu um campo de temperatura relativamente estável e suavização da taxa de resfriamento em comparação com o método em zigue-zague, tornando a amostra com mais passes de desvio de contorno com tensões residuais de tração menores.

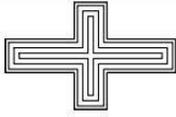
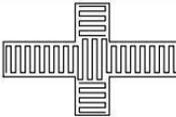
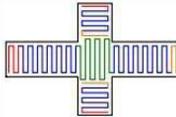
Michel *et al.* (2019) discorre a respeito de uma solução caracterizada como Modular Path Planning (MPP) que divide a camada em seções de deposições individuais, permitindo, assim, realizar adaptação em relação ao planejamento do caminho à geometria idealizada, tornando viável a construção de uma gama de geometrias complexas.



Fonte: Michel *et al.* (2019).

Aplicando o MPP na fabricação de uma peça, percebeu-se a obtenção de um resultado final muito satisfatório, como exemplificado na Figura 2.

Figura 2 - Estudo do MPP em comparação a outros métodos

	Tool path based on adaptive path planning [9]		MPP (segmentation only)	MPP (segmentation + zones)
Tool paths	 (a)		 (f)	 (i)
Plan view results	 (b)	 (d)	 (g)	 (j)
Side view	 (c)	 (e)	 (h)	 (k)

Fonte: Michel *et al.* (2019).

Dessa forma, fica evidente a importância de determinar um método de trajetória satisfatório, haja vista que, como apresentado anteriormente, a trajetória é de suma importância no que tange o resultado final da peça, seja em termos de resistência mecânica, dureza, tensão residual, entre outros, conforme apontam Michel *et al.* (2019) e Zhang *et al.* (2020). Oportunistamente, é válido destacar que um dos pilares para obter os resultados está sendo construído, que é o desenvolvimento de uma cultura de estudos na Universidade Federal de Goiás (UFG) sobre o processo MASA.

Conclusões

Entende-se, portanto, que a pesquisa é de extrema importância, haja vista que o desenvolvimento de peças e o estudo das fases que envolve seu processo de fabricação proporcionará conhecimentos capazes de auxiliar no fomento do desenvolvimento do setor industrial do Centro Oeste brasileiro.

Referências

ALBERTI, E. A.; BUENO, B. M. P.; D'OLIVEIRA, A. S. C. M. Processamento de Ligas de Níquel com Técnica de Manufatura Aditiva Utilizando Plasma por Arco Transferido. *Soldagem & Inspeção*, v. 20, n. 2, p. 137- 147, 2015.

MICHEL, F.; LOCKETT, H.; DING, J.; MARTINA, F.; MARINELLI, G. A modular path planning solution for Wire + Arc Additive Manufacturing. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, v. 60, p. 1-11, 2019.

ZHANG, C.; SHEN, C.; HUA, X.; LI, F.; ZHANG, Y.; ZHU, Y.; Influence of wire-arc additive manufacturing path planning strategy on the residual stress status in one single buildup layer. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 111, n. 3-4, p. 797-806, 2020.

INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE INTERPASSE NO PERFIL DE UMA PAREDE EM AÇO AO CARBONO FABRICADA POR MANUFATURA ADITIVA PELO PROCESSO MADA

Antonio José Arcanjo Filho,¹ Demóstenes Ferreira-Filho,² Daniel Souza³

Introdução

A combinação de um arco elétrico como fonte de calor e um arame metálico como matéria-prima é referida cientificamente como Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) ou Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA), e tem sido investigada para fins de Additive Manufacturing - Manufatura Aditiva (AM) desde a década de 1990 (Williams, *et al.*, 2016).

Os estudos de diferentes parâmetros da MADA demonstram uma variabilidade de propriedades mecânicas, fator extremamente importante para a aplicação industrial deste processo. A maioria dos trabalhos estudados analisou as propriedades mecânicas das peças fabricadas por MADA, com ênfase na resistência mecânica à tração, compressão e propriedades de dureza, resiliência, trincas, falhas e outras características das peças (Ghaffari, *et al.*, 2019; Hackenhaar, 2020).

1 Universidade Federal de Goiás – arcanjoeng@ufg.br.

2 Universidade Federal de Goiás – demostenesferreira@ufg.br.

3 Universidade Federal de Goiás - daniel.souza@ufg.br.

A grande preocupação da pesquisa relacionada a MADA tem sido as propriedades de tração e dureza; defeitos de solidificação e de deposição, que podem causar uma variedade de propriedades mecânicas e também trincas ou falhas de continuidade do cordão de solda que forma a peça produzida.

Metodologia

A construção das paredes foi realizada pelo empilhamento de 10 cordões metálicos construídos com arame ER70S-6 de 1,0 mm de diâmetro, com alimentação de 3,1 m/min, sob uma chapa de aço ASTM A-36, por meio do processo de deposição MADA, utilizou uma fonte de marca IMC Digitec com auxílio de um braço robótico Yaskawa HP20 para direcionamento do bico de solda e controle da velocidade de movimentação da deposição. A deposição foi realizada com os seguintes parâmetros: velocidade de deslocamento do robô de 3,63 mm/s, gás de proteção Ar+25%CO₂, com vazão de 25 l/min, GAP de 2,1 mm, distância de contato bico-peça de 13 mm, tensão previamente ajustada de 18 V.

Foi construído um total de 4 paredes de 200 mm de comprimento, sendo que cada uma passou por um processo de resfriamento entre cada passe, nas temperaturas de 50 °C, 100 °C, 150 °C e sem resfriamento (S.R).

Para preparação metalográfica, segmentou-se a chapa e as paredes construídas em 4 blocos, e após este processo os blocos foram lixados e polidos para posteriormente serem utilizados nas medições de dureza.

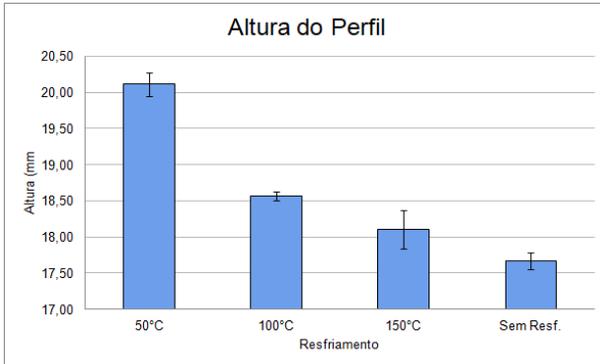
As medições geométricas das paredes foram feitas pelo uso de paquímetro (alturas) e pelo *software* ImageJ (larguras a cada 1 mm). A medição de dureza foi realizada utilizando o microdurômetro Mitutoyo Vickers HV100.

Resultados e discussão

A medição das alturas observou um comportamento dependente da temperatura de resfriamento, considerando que quanto menor a temperatura de resfriamento, maior foi a altura da parede, conforme expresso na Figura 1, que contém as alturas da parede.

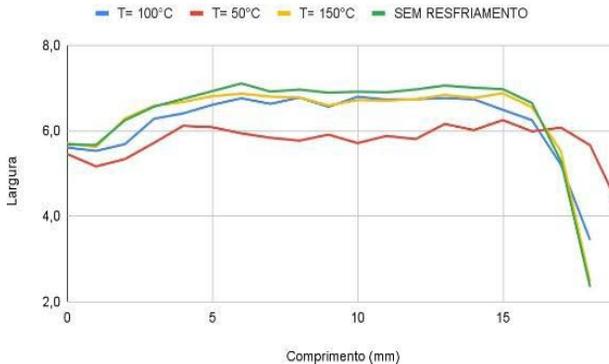
O comportamento da largura da parede demonstrou que o resfriamento em temperaturas menores entre passes garantiu uma uniformidade maior, enquanto o resfriamento com temperaturas superiores demonstrou uma maior área de molhabilidade da deposição, conforme a Figura 2.

Figura 1 - Gráfico da altura das Paredes



Fonte: Elaboração própria.

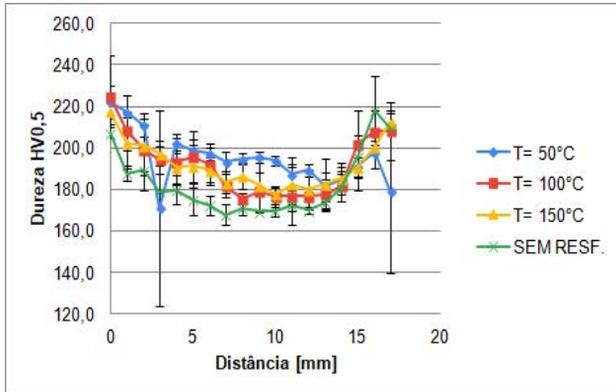
Figura 2 - Gráfico da largura das Paredes
Largura do Perfil do cordão



Fonte: Elaboração própria.

A dureza do material sofreu uma variação na parte mais central da parede, o que ocorreu devido aos efeitos térmicos do empilhamento de cordões. A variação é demonstrada na Figura 3.

Figura 3 - Variação da Dureza



Fonte: Elaboração própria.

Conclusões

O resfriamento influencia em alto grau as propriedades geométricas e mecânicas de uma peça fabricada por MADA.

Referências

WILLIAMS, S. W.; MARTINA, F.; ADDISON, A. C.; DING, J.; PARDAL, G.; COLEGROVE, P. Wire + Arc Additive Manufacturing. *Materials Science and Technology*, v. 32, n. 6, p. 641-647, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1179/1743284715Y.0000000073>.

GHAFFARI, M.; NEMANI, A. V.; RAFIEAZAD, M.; NASIRI, A. M. Effect of Solidification Defects and HAZ Softening on the Anisotropic Mechanical Properties of a Wire Arc Additive-Manufactured Low-Carbon Low-Alloy Steel Part. *JOM*, v. 71, n. 11, p. 4215–4224, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11837-019-03773-5>.

HACKENHAAR, W. Estudo das Propriedades Mecânicas e do Resfriamento em Manufatura Aditiva por Deposição a Arco. 2020. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

SOBRE E-BOOK

Tipografia: Nassim Latin, Alegreya Sans SC

Publicação: Cegraf UFG
Câmpus Samambaia, Goiânia-
Goiás. Brasil. CEP 74690-900
Fone: (62) 3521-1358
<https://cegraf.ufg.br>
