

Anais do 2º Congresso  
do Programa de Pós-Graduação em

# **ENGENHARIA MECÂNICA 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*

**Revisores Técnicos**

*André Contin*

*Andreia Aoyagui Nascimento*

*Aristeu da Silveira Neto*

*Daniel Fernandes da Cunha*

*Daniel Souza*

*Demostenes Ferreira Filho*

*Felipe Pamplona Mariano*

*Gino Bertollucci Colherinhas*

*João Paulo da Silva Fonseca*

*Leonardo de Queiroz Moreira*

*Marlipe Garcia Fagundes Neto*

*Rodrigo Pinto Lemos*

*Salviano de Araújo Leão*

*Valtair Antonio Ferraresi*

*Zenón José Guzmán Del Prado*

Anais do 2º Congresso  
do Programa de Pós-Graduação em

# **ENGENHARIA MECÂNICA UFG**

Organizadores:

Daniel Souza  
Demostenes Ferreira Filho  
Felipe Pamplona Mariano

**Cegraf UFG**

2023

© Cegraf UFG, 2023

© Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica / UFG, 2023

© Daniel Souza; Demostenes Ferreira Filho; Felipe Pamplona  
Mariano, 2023

Capa, projeto gráfico e diagramação

*Julyana Aleixo Fragoso*

Normalização técnica (ABNT)

*Andressa Moreira Salarini*

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

Bibliotecária responsável: Joseane Pereira / CRB1: 2749

C749 Congresso do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. (2. : 2022 : Goiânia, GO).

Anais do 2 ° Congresso do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - UFG[Ebook] /organizadores, Daniel Souza, Demostenes Ferreira Filho, Felipe Pamplona Mariano. – Dados eletrônicos (1 arquivo : PDF). - Goiânia : Cegraf UFG, 2023.

ISBN (Ebook): 978-85-495-0715-0

Evento realizado nos dias : 13 a 16 de dezembro de 2022 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. Ferreira Filho, Demostenes. III. Mariano, Felipe Pamplona. IV. Título.

**CDU : 621**

## **Homenagem ao Prof. José Lúcio Gonçalves Júnior**

A EMC e o PPGMEC/UFG homenageiam o Prof. Dr. José Lúcio Gonçalves Júnior que faleceu no dia 22/08/2022.

Um breve histórico de sua vida, nas palavras de Daniel Fernandes da Cunha e de Demostenes Ferreira Filho:

“O amigo e colega de profissão José Lúcio Gonçalves Júnior formou-se Engenheiro Mecânico pela Universidade Federal de Uberlândia em 2009. Especialista em Engenharia de Segurança do Trabalho pela Faculdade Pitágoras em 2011. Mestre em 2012 e Doutor em 2016, também pela Universidade Federal de Uberlândia em Engenharia Mecânica na área de materiais, gerou contribuições relevantes para a Engenharia Mecânica, especialmente, na linha de tribologia, tanto em termos de desenvolvimentos experimentais que ainda são aplicados no Laboratório de Tribologia e Materiais (LTM), quanto em publicações em periódicos internacionais.

Em 2016, mudou-se para Goiânia após ser aprovado em concurso público para professor efetivo na área de Materiais do curso de Engenharia Mecânica da EMC/UFG. Chegou em um momento que a Engenharia Mecânica ainda não estava estruturada em termos de espaço físico e fez diferença participando efetivamente de instalações de equipamentos, treinamentos, melhorias e movimentação dos equipamentos para os espaços físicos destinados para o curso, contribuindo significativamente para a consolidação da linha de Materiais e Processos de Fabricação e da graduação em Engenharia Mecânica da UFG.

Além das disciplinas na área de Materiais que ministrava para o curso de Engenharia Mecânica, aplicou seus conhecimentos em

Segurança do Trabalho coordenando a equipe da EMC na criação de rotinas de Integração em Segurança do Trabalho nos Laboratórios da Engenharia Mecânica, aplicando de forma prática a segurança do trabalho na rotina dos discentes, prezando pela saúde e segurança e possibilitando vivenciar as rotinas corretas em um ambiente industrial. Atuava também na extensão, onde coordenava a Equipe Caryocar Baja/UFG com o intuito de motivar os alunos de graduação a aplicar os conteúdos teóricos em uma aplicação prática na construção de um veículo de competição.

Na pós-graduação foi um dos sonhadores que participou efetivamente da concepção, submissão das APCNs, aprovação do PPGMEC junto à CAPES e implantação do mestrado em Engenharia Mecânica, mas infelizmente não chegou a participar das primeiras defesas de mestrado, que ocorrerão no início de 2023. Mas deixará como legado os discentes que estava orientando e coorientando, além das parcerias com profissionais de outras instituições de ensino superior que ajudaram a estreitar os laços.

Essa era uma de suas principais características pessoais, a facilidade de se relacionar com as pessoas e sua personalidade agregadora. Seu carisma ímpar e dedicação neste pouco tempo que esteve conosco auxiliou a fortalecer o sentimento de que trabalhamos não apenas em um excelente grupo de trabalho, mas que somos verdadeiramente uma família.

Sentiremos eternamente sua falta e dedicamos este congresso em sua homenagem.”

Goiânia, dezembro de 2022

Professores da Engenharia Mecânica EMC/UFG.

# Sumário

	APRESENTAÇÃO DO CONGRESSO .....	8
<i>André Martins André Contin Daniel Fernandes da Cunha</i>	UTILIZAÇÃO DO LASER DE CO <sub>2</sub> DE BAIXA POTÊNCIA PARA O TRATAMENTO SUPERFICIAL DE AÇO INOXIDÁVEL AISI 304 .....	11
<i>Jéssica Luana da Silva Santos Adailton da Silva Borges Andreia Aoyagui Nascimento</i>	ESTUDO BIDIMENSIONAL DO MÉTODO PSEUDOESPECTRAL DE FOURIER UTILIZANDO A SOLUÇÃO MANUFATURADA DE TAYLOR-GREEN.....	19
<i>Cássia Silva de Azevedo Maia Felipe Pamplona Mariano</i>	CONTROLE DA ALTURA DA CAMADA LIMITE ATRAVÉS DO ÂNGULO DE FLAPE .....	27
<i>Douglas Neves Nascentes Felipe Pamplona Mariano</i>	ESCOAMENTO SOBRE CILINDRO CIRCULAR LISO ESTÁTICO .....	40
<i>Fábio Ribeiro von Glehn João Paulo da Silva Fonseca Marlipe Garcia Fagundes Neto</i>	REVISÃO SISTEMÁTICA SOBRE A UTILIZAÇÃO DE DADOS DA TELEMÁTICA E TÉCNICAS DE MACHINE LEARNING PARA REDUÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA (DIESEL) E EMISSÕES DE POLUENTES EM CAMINHÕES RODOVIÁRIOS .....	51
<i>Gabriela Rocha Franço João Paulo da Silva Fonseca</i>	UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA SOBRE OBTENÇÃO DE DADOS DE FLUXO E ESCOAMENTO EM TUBULAÇÕES .....	63

*Gustavo de Castro Lopes  
Demostenes Ferreira Filho  
Valtair Antônio Ferraresi  
Daniel Souza* **PROCESSO DE MANUFATURA ADITIVA POR  
DEPOSIÇÃO A ARCO (MADA) EM AÇO CARBONO  
COM E SEM ADIÇÃO DE ARAME FRIO .....74**

*Isadora Venancio Bastos  
Felipe Pamplona Mariano* **SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS DE  
ESCOAMENTOS SOBRE AEROFÓLIOS E ASAS  
PARA O DESENVOLVIMENTO DE AERONAVES  
DE PEQUENO PORTE ..... 85**

*Julia Jorge Bastos  
Andreia Aoyagui Nascimento* **ESCOAMENTOS SOBRE OBSTÁCULO NO  
INTERIOR DE DUTO DE SEÇÃO RETANGULAR .....97**

*Júlio Modesto Beghelli  
Felipe Pamplona Mariano* **OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS DE VENTILAÇÃO  
E AR-CONDICIONADO USANDO DINÂMICA DOS  
FLUIDOS COMPUTACIONAL ..... 105**

*Leandro Neves de Assis  
Martipe Garcia Fagundes Neto* **ESTUDO EXPERIMENTAL DO LEIAUTE DE  
DISPOSIÇÃO DOS MATERIAIS DE ABSORÇÃO  
SONORA EM UMA SALA DE AULA.....117**

*Lucas Marques Monteiro  
Felipe Pamplona Mariano* **MODELAGEM NUMÉRICA E COMPUTACIONAL  
DE ESCOAMENTOS SOBRE UM AEROFÓLIO  
USANDO A METODOLOGIA IMERSPEC ..... 129**

*Lucas Lauriano da Silva  
Alana da Silva Magalhães  
Junio Santos Bulhões* **ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E DE  
TRATAMENTO DE ÁGUA NO SANEAMENTO:  
COMPARAÇÃO ENTRE UNIDADES COM  
EQUIPAMENTOS NOVOS E ANTIGOS ..... 141**

*Maycon Marques  
Júlia Purificação  
Andreia Nascimento  
Diogo Colvero* **AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO  
ESCOAMENTO EM TÚNEL DE VENTO ..... 153**



*Pedro Augusto Dias Rodrigues  
Marlipe Garcia Fagundes Neto  
Sigeo Kitatani Junior* **UTILIZAÇÃO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL PARA  
PREDIÇÃO DOS EFEITOS DE CARGAS DE VENTO  
SOBRE UMA VIGA ENGASTADA ..... 164**

*Renata Rodrigues Alves  
Daniel Fernandes Cunha  
Kléber Mendes de Figueiredo  
Wilian da Silva Labiapari* **EFEITO DO TEMPO DE AUSTENITIZAÇÃO  
SOBRE DUREZA E SUSCEPTIBILIDADE À  
CORROÇÃO INTERGRANULAR DO AÇO  
INOXIDÁVEL FERRÍTICO 410D ..... 174**

*Sara Gabriela Rodrigues de Andrade Silva  
Leonardo de Queiroz Moreira* **SIMULAÇÃO DA CAMADA LIMITE UTILIZANDO  
FERRAMENTA DE CÓDIGO ABERTO ..... 183**

*Thales Marcelo Pereira Rodrigues  
Demostenes Ferreira Filho* **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA: REVESTIMENTOS  
DE LIGAS DE COBALTO, CARACTERIZAÇÃO  
MICROESTRUTURAL E ANÁLISE TRIBOLÓGICA..... 195**

*Thiago Rogaleski Marques  
Andreia Aoyagui Nascimento* **ESCOAMENTO COM BAIXO NÚMERO DE REYNOLDS  
SOBRE UM PAR DE CILINDROS .....203**

*Vitória Ferreira de Oliveira Marques  
Valtair Antônio Ferraresi  
Daniel Souza* **ANÁLISE MICROESTRUTURAL DE REVESTIMENTO  
DURO APLICADOS PELO PROCESSO FCAW COM  
ADIÇÃO DE ARAME NÃO ENERGIZADO PARA  
DIFERENTES COMBINAÇÕES..... 212**

*Weslei Rodrigues Niz  
Daniel Souza  
Demostenes Ferreira Filho* **INFLUÊNCIA DA TENSÃO NA REGULARIDADE DO  
PROCESSO MIG/MAG POR CURTO-CIRCUITO ..... 221**

*Wesley Oliveira da Rocha  
Daniel Souza  
Alice Gonçalves Osorio* **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE MICROESTRUTURA  
DO REVESTIMENTO A BASE DE FeCrC DEPOSITADO  
PELO PROCESSO FCAW .....232**

## APRESENTAÇÃO DO CONGRESSO

O 2º Congresso do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Goiás (PPGMEC/UFG) foi criado com o objetivo de discutir as pesquisas em desenvolvimento e tendências futuras no âmbito do Programa. Sendo que nesta segunda edição, sendo a primeira em formato presencial, enfatiza o principal intuito deste congresso, que é a interação entre os discentes, docentes e servidores para maximizar a disseminação dos conhecimentos que estão sendo desenvolvidos.

Este ano (2022) o Congresso foi composto por diversas atividades, sendo duas palestras: “Simulações de Problemas em Engenharia: Método sem Malha – SPH – palestrante Prof. Dr. Joel Roberto Guimarães Vasco EECA/UFG” e “A importância das publicações para o intercâmbio – palestrante Dr. Diogo Appel Colvero; dois minicursos de “Introdução ao software LaTeX”, ministrado pelo Prof. Dr. Sigeo Kitatani Júnior e “Introdução ao software RoboDK”, proferido pelo Prof. Dr. Marco Antonio Assfalk de Oliveira; 24 apresentações de trabalhos científicos e finalizou com a Reunião Anual de Autoavaliação do PPGMEC.

Esperamos que todos tenham tido um encontro proveitoso.

Goiânia, dezembro de 2022

Comissão Organizadora.

# UTILIZAÇÃO DO LASER DE CO<sub>2</sub> DE BAIXA POTÊNCIA PARA O TRATAMENTO SUPERFICIAL DE AÇO INOXIDÁVEL AISI 304

André Martins' (andre.eng.mec@outlook.com)

André Contin' (andre.contin@ufg.br)

Daniel Fernandes da Cunha' (danielcunha@ufg.br)

'Universidade Federal de Goiás

**Resumo:** Nas indústrias em geral, os aços inoxidáveis da família AISI 304 são muito utilizados devido a sua alta resistência à corrosão e a ações da umidade. Muitos componentes trabalham em ambientes suscetíveis a alta temperatura e alta pressão, mas possuem baixa resistência ao desgaste e corrosão e para melhorar estas propriedades, procura-se algum tipo de tratamento superficial. O objetivo do tratamento do substrato é o endurecimento da superfície, como também na alteração nas propriedades metalúrgicas do substrato. Neste trabalho, a fim de buscar um tratamento acessível, de baixa potência e de baixo custo, foi utilizado um laser de CO<sub>2</sub> de 100 W como fonte de calor para o tratamento superficial do aço inox AISI 304. Foi também empregado o pó de negro de fumo como material foto absorvedor da radiação eletromagnética. Os resultados mostraram um aumento da dureza superficial (HV) significativa, encontrado em alguns casos, com extensões de até 11µm da superfície quando comparado com o substrato sem a irradiação via laser.

**Palavras-chave:** laser CO<sub>2</sub>; aço inoxidável; tratamento superficial; cementação; revestimento a laser.

## 1. INTRODUÇÃO

Os aços inoxidáveis são aplicados 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 (ZAFFORA, 2021). Dentre os tipos de aços inoxidáveis, os aços inoxidáveis austeníticos são os mais empregados nas indústrias farmacêuticas, alimentícias em razão da resistência à corrosão e ausência de contaminação dos produtos formados (MICHLER, 2016). No entanto, 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 incremento da dureza e resistência ao desgaste podem ser obtidos alterando as propriedades superficiais desses materiais, através de processos de tratamentos superficiais. Os tratamentos superficiais modernos incluem o laser como fonte de calor; o laser apresenta vantagens sobre as técnicas convencionais de modificação de superfícies, como a precisão, mínima distorção térmica, facilidade de automação, controle do processo, tratamento superficiais em áreas pequenas (KATSAMA, 2001).

Para um feixe com perfil gaussiano, a densidade de energia ( $J/mm^2$ ) é definida pelo produto da irradiância pelo tempo de interação do feixe na superfície do substrato (SANTOS, 2017), conforme a Equação 1:

$$E=(4Ptot)/(\pi wvd) \quad (1)$$

Consequentemente, o emprego de uma maior velocidade de varredura do feixe gera em uma menor fluência. No entanto, as microestruturas dos revestimentos podem ser diferentes para uma densidade de energia constante. Uma elevada velocidade

de varredura produz uma maior taxa de resfriamento e consequentemente uma microestrutura mais fina (LIU, 2014).

## 2. METODOLOGIA

### 2.1 Técnicas de Caracterização

As imagens do microscópio fotônico foram usadas para examinar as morfologias das superfícies dos substratos após o processo de irradiação via laser. Todas as análises e imagens foram realizadas nos microscópios ZEISS Axio Imager M2 e ZEISS Stereo Discovery V.8 pertencentes ao Laboratório de Materiais e Processos de Fabricação (LAMAF) da EMC/UFG. As análises de dureza Vickers (HV) foram realizadas com microdurômetro de Marca Mitutoyo modelo HM-200 localizado no Laboratório de Materiais e Processos de Fabricação (LAMAF). Os parâmetros para a análise na superfície da amostra foram: 50gf de carga e 10s de duração; já na seção transversal da amostra, 10gf de carga e 10s de duração.

### 2.2 Preparação das Amostras

Para desenvolvimento do trabalho foi empregado o aço inoxidável AISI 304, adquirido comercialmente. As amostras foram usinadas em pastilhas de 5 mm de espessura e 25,5 mm de diâmetro. Após o processo de usinagem, as amostras foram lixadas com lixas de granulometria de 80, 220, 320, 600 e 2000 e logo em seguida polidas, usando pasta de alumina com granulometria de 1,0  $\mu\text{m}$  e 0,3  $\mu\text{m}$ .

### 2.3 Processo de Irradiação via laser

O processo de irradiação via laser foi realizado na EMC/UFG nas dependências do Laboratório de Materiais e Processos de Fabricação.

Os principais parâmetros do laser são:

- Potência de saída igual a 100 W;
- Potência de saída empregada no trabalho: 70-80 W
- Diâmetro do feixe de 300  $\mu\text{m}$ ;
- Comprimento de onda de 10,6  $\mu\text{m}$ ;

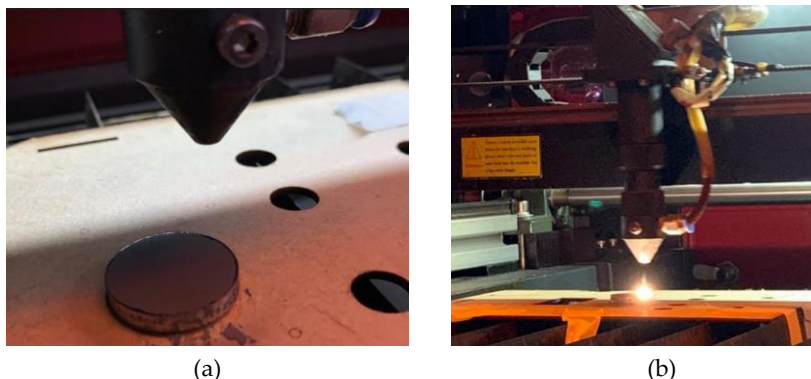
Os principais parâmetros de irradiação do laser são:

- Resolução: Número de pontos por polegada quadrada (ppp);
- Velocidade de varredura do feixe: A velocidade de varredura indica o tempo de irradiação em cada ponto;
- Número de Ciclos de Aquecimento (NCA): Define o número de vezes que uma região é irradiada pelo feixe do laser;

O método de aplicação do pó de negro de fumo foi a pré-deposição foi feita pelo método de imersão, que consiste na imersão da amostra, com o auxílio de uma pinça anatômica em uma solução contendo 15g de negro de fumo e 100mL álcool etílico 92,8 %. Em seguida, após a secagem, é feita sua irradiação com o feixe de laser.

A Fig. 1 mostra o substrato recoberto com o negro de fumo (a) e em o processo de irradiação do feixe de laser sobre o substrato recoberto com negro de fumo (b). O pó de negro de fumo possui partícula de dimensão nanométrica (VASCONCELOS, 2012) e foi doado pelo Laboratório de Desenvolvimento de Aplicações de Lasers e Óptica (DedALO) do Instituto de Estudos Avançados (IEAv).

Figura 1 - (a) Substrato recoberto com negro de fumo, (b) processo de irradiação via laser



Fonte: o autor.

Para a seleção de parâmetros do laser, foi elaborada uma carta de processo em um substrato, contendo 13 retângulos com área de 15 mm<sup>2</sup>, no qual foram variados os parâmetros de velocidade de varredura do feixe, densidade de energia e resolução. A Tab. 1 mostra os parâmetros da carta de processo.

Tabela 1 - Carta de Processo

Retângulos	Velocidade (mm/s)	Resolução (ppp)	Número de ciclos de aquecimento	Densidade da energia (J/mm <sup>2</sup> )
01	80	2540	1	8,49
02	80	847	1	8,49
03	80	423	1	8,49
04	80	282	1	8,49
05	60	2540	1	11,32
06	60	847	1	11,32
07	60	423	1	11,32
08	60	282	1	11,32
09	60	212	1	11,32
10	40	2540	1	16,98
11	40	847	1	16,98
12	40	423	1	16,98
13	40	282	1	16,98

Fonte: o autor.

A Tab. 2 mostra os parâmetros escolhidos para a irradiação na área completa do substrato.

Tabela 2 - Parâmetros escolhidos

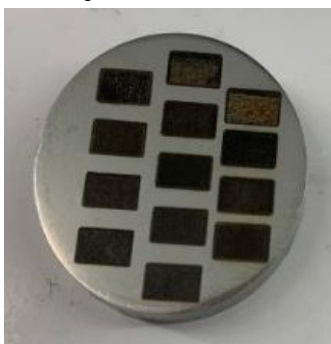
Substrato	Retângulo	Velocidade (mm/s)	Resolução (ppp)	Número de ciclos de aquecimento	Densidade da energia (J/mm <sup>2</sup> )
1	2	80	850	1	8,49
2	4	80	300	1	8,49
3	7	60	400	1	11,32

Fonte: o autor.

### 3. RESULTADOS OBTIDOS

A Fig. 2 mostra o substrato com os treze retângulos da carta de processo. É possível identificar a diferença de morfologia das superfícies dos retângulos.

Figura 2 - Fotografia da superfície do substrato com a carta de processo

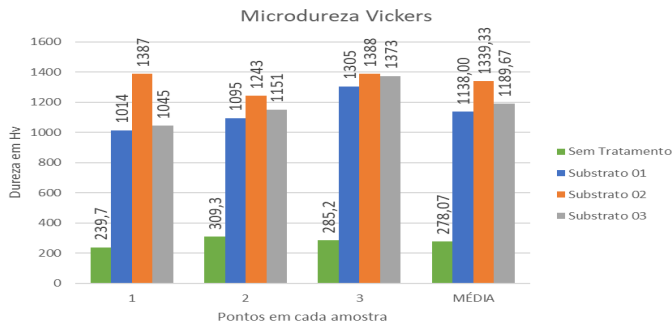


Fonte: o autor.

Os retângulos 2, 4 e 7 foram escolhidos em termos da ausência de trincas superficiais e refusão, para a irradiação total da área para análise de microdureza Vickers. A figura 3 mostra as durezas dos substratos escolhidos e sua comparação com o substrato sem irradiação via laser.



Figura 3 - Média de aumento de microdureza Vickers nas superfícies dos substratos

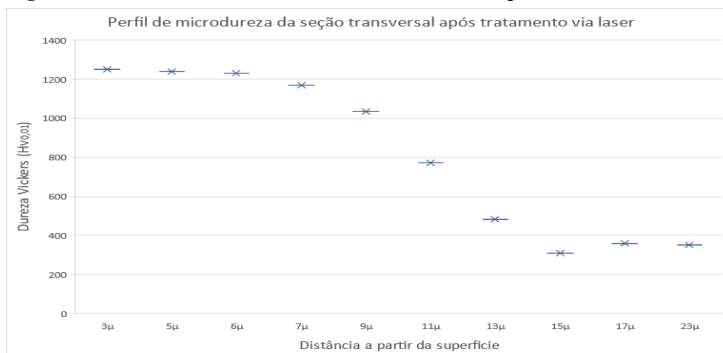


Fonte: o autor.

Fica evidenciado o aumento de dureza superficial do substrato irradiado via laser quando comparado com o substrato sem o revestimento, fato que mostra a aplicabilidade de um laser de baixo custo para aumento de dureza superficial, como também a eficácia do emprego do negro de fumo. No substrato 02 foi analisado o perfil de dureza na seção transversal da amostra, Fig. 4.

O perfil de microdureza HV da seção transversal mostra um aumento da dureza na superfície do substrato e diminui gradualmente para o substrato, perfil semelhante ao encontrado no trabalho de Mahamood (2013) para um aço inox 304 recoberto por carbeto de titânio

Figura 4 - Perfil de microdureza da seção transversal após tratamento via laser



Fonte: o autor.

## 4. CONCLUSÕES

Os resultados demonstram a viabilização do emprego de um laser de CO<sub>2</sub> de baixo custo para tratamentos via laser; como também o aumento da dureza superficial do substrato de aço inox recoberto com negro de fumo.

## REFERÊNCIAS

KATSAMA, A. I.; HAIDEMENOPOULOS, G. N. Laser-beam carburizing of low-alloy steels. **Surface and Coatings Technology**, [s. l.], 30 ago. 2000.

LIU, Kun; LI, Yajiang; WANG, Juan; MA, Qunshuang. Effect of high dilution on the in-situ synthesis of Ni-Zr/Zr-Si (B, C) reinforced composite coating on zirconium alloy substrate by laser cladding. **Materials and Design**, [s. l.], 4 ago. 2015.

MAHAMOOD, Rasheedat M. *et al.* Scanning velocity influence on microstructure, microhardness and wear resistance performance of laser deposited Ti6Al4V/TiC composite. **Materials and Design**, [s. l.], 28 mar. 2013.

MICHLER, T. **Austenitic Stainless Steels**. Germany: Adam Opel, 2016.

SANTOS, C. L. **Estudo do processo de sinterização/fusão de Stellite 6 com laser de CO<sub>2</sub> de 125 W**. 2017. 125 f. Tese (Doutorado em Física e Matemática Aplicada) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2017.

ZAFFORA, A. *et al.* Corrosion of stainless steel in food and pharmaceutical industry. **Current Opinion in Electrochemistry**, Elsevier, v. 29, 2021.

# ESTUDO BIDIMENSIONAL DO MÉTODO PSEUDOESPECTRAL DE FOURIER UTILIZANDO A SOLUÇÃO MANUFATURADA DE TAYLOR-GREEN

Jéssica Luana da Silva Santos<sup>1</sup> (jessika-luana@hotmail.com)  
Adailton da Silva Borges<sup>2</sup> (adailton@professores.utfpr.edu.br)  
Andreia Aoyagui Nascimento<sup>1</sup> (aanascimento@ufg.br)

<sup>1</sup>Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharias Elétrica Mecânica e de Computação

<sup>2</sup>Universidade Federal Tecnológica do Paraná, Curso de Engenharia Mecânica

**Resumo:** Este trabalho aborda a solução das equações proposta por Taylor-Green, para verificação bidimensional às equações de Navier-Stokes e da equação da Conservação da massa. As condições utilizadas, foram massa específica constante, regime transiente, propriedades constantes. O código verificado é baseado no método pseudoespectral de Fourier para discretização espacial, e utiliza o método de Runge-Kutta de 4ª ordem e 6 passos explícitos no tempo para discretização temporal. Os resultados, qualitativos e quantitativos, são mostrados e discutidos, abrangendo a ordem de convergência numérica.

**Palavras-chave:** verificação numérica; solução manufaturada; método pseudoespectral de Fourier.

## 1. INTRODUÇÃO

De forma geral pode-se dizer que no passado existiam duas formas de se tentar desvendar as leis da natureza: através de método experimental, e os métodos analíticos. Enquanto, o método experimental procura reproduzir as leis da natureza através de experimentos, o método matemático transforma ditas leis em relações matemáticas entre grandezas observadas, usando ferramentas do cálculo diferencial e integral (HERNÁNDEZ, 2006). Posteriormente passou a existir os métodos numéricos, possibilitando solução de equações mais complexas.

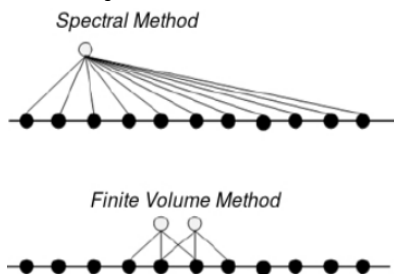
Os métodos analíticos apresentam muitas limitações, pois só podem ser aplicados em problemas com geometrias simples cuja hipótese simplificadora os desviam demasiadamente do fenômeno físico real. No entanto têm um papel importante na verificação dos métodos numéricos.

Os métodos numéricos podem ser resolvidos por quatro diferentes técnicas de solução dentre elas podem ser citadas: método de diferenças finitas, método dos elementos finitos, método dos volumes finito (MALISKA, 1995), e método espectral (CANUTO, 2006). Em geral as etapas dos métodos numéricos possibilitam a aproximação das variáveis de fluxo desconhecido através de funções simples, discretização por substituição das aproximações nas equações que regem o fluxo e subseqüente manipulações matemáticas e soluções das equações algébricas (VERSTEEG; MALALASEKERA, 1995; MALISKA, 1995).

Os métodos espectrais apresentam grandes benefícios, com relação às demais técnicas, como por exemplo, baixos erros de aproximação pois, as equações são discretizadas tomando como base as séries de Fourier ou Chebyshev, além de possuir maior acurácia sem a necessidade do uso de elevada quantidade pontos

para discretização do domínio. Isto ocorre, pois os métodos espectrais aplicados para problemas com soluções suaves atingem altas taxas de convergência espacial, pois utiliza todos os pontos de colocação para calcular uma derivada em um ponto, Fig. 1.

Figura 1 - Esquema do método espectral e método dos volumes finitos utilizado nas operações de derivativos



Fonte: o autor.

O presente trabalho tem como objetivo a aprendizagem e manipulação do código bidimensional IMERSPEC2D, o qual é baseado no método pseudoespectral de Fourier com acoplamento do método da fronteira imersa. Tal aprendizagem foi realizada por meio do procedimento de verificação do código, ou seja, com a implementação e análise dos resultados da solução manufaturada de Taylor-Green.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1 Modelagem Matemática

O modelo matemático para solução da parte fluidodinâmica consiste na equação de conservação da massa, Eq. 1, nas equações de Navier-Stokes, Eq. 2, considerando um escoamento bidimensional, incompressível, isotérmico e com propriedades constantes, onde  $f$  é o termo fonte,  $\rho$  é a massa específica, e os índices  $i, j$  refere-se aos índices tensoriais.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_j u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \left( \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \right) + f_i \quad (2)$$

As equações matemáticas utilizadas para o processo de verificação, foram as propostas por Taylor-Green, 1937 (*apud* ABDEL-SAMIE *et al.*, 2021), Eq. 3 a Eq. 5, tal equacionamento foi escolhido por possuir termo fonte nulo nas equações de Navier-Stokes.

$$u^a = -u_0 \cos\left(\frac{x}{L}\right) \sin\left(\frac{y}{L}\right) e^{-\frac{2\nu t}{L^2}} \quad (3)$$

$$v^a = -u_0 \cos\left(\frac{x}{L}\right) \sin\left(\frac{y}{L}\right) e^{-\frac{2\nu t}{L^2}} \quad (4)$$

$$p^a = -\frac{u_0^2 \rho}{4} \left[ \cos\left(\frac{x}{L}\right) \sin\left(\frac{y}{L}\right) \right] e^{-\frac{4\nu t}{L^2}}, \quad (5)$$

onde,  $u^a$ ,  $v^a$  e  $p^a$  são os campos analíticos de velocidades horizontal e vertical e pressão respectivamente,  $L$ , é o comprimento do vórtice,  $x$  e  $y$  são as coordenadas cartesianas e  $u_0$  é a velocidade máxima.

## 2.2 Modelagem Numérica

A solução das equações de Navier-Stokes e da equação da conservação da massa utilizando o método pseudo-espectral de Fourier consiste na transformação de cada equação, para o espaço espectral, o que é realizado pela Transformada de Fourier. Assim, a Eq. 1 e Eq. 2 podem ser escritas como mostrado nas Eq. 6 e Eq. 7, onde  $k$  é número de onda,  $\hat{u}_i$  é o vetor velocidade transformado para o espaço Fourier,  $i$  é o número complexo.

$$\frac{\partial \hat{u}_i^t}{\partial x_j} = 0 \Rightarrow ik_j \hat{u}_j \tag{6}$$

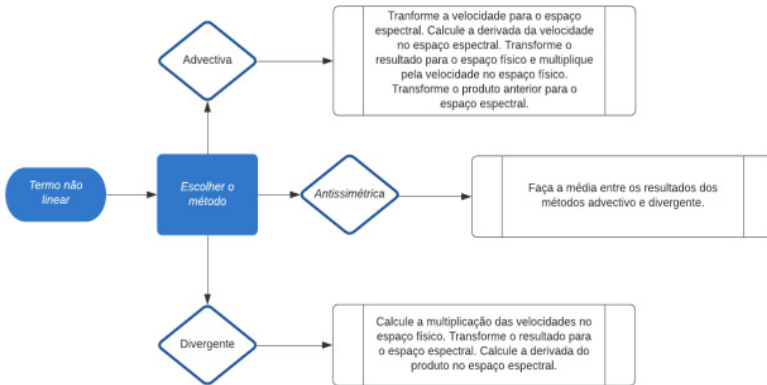
$$\frac{\partial \hat{u}_i}{\partial t} = -ik_i \hat{p} - ik_j (u_i * u_j) + v(ik)^2 \hat{u}_i + \hat{f}_i \tag{7}$$

O termo advectivo da Eq. 7 pode ser resolvido utilizando a metodologia antissimétrica, Fig. 2, evitando a solução do produto de convolução  $(u_i * u_j)$  (CANUTO *et al.*, 2006; SOUZA, 2005; MARIANO, 2011) e a Eq.6 define o plano  $\pi$ , o qual é denominado de plano de divergência nula (CANUTO *et al.*, 2006), no qual são projetadas todos os termos da Eq. 7, por consequência, desacopla-se o termo de pressão da solução dos campos de velocidades (MARIANO, 2011; NASCIMENTO, 2016),

$$L_2 = \sqrt{\frac{w_x w_y}{\sum_{i,j} (\phi_{ij}^a - \phi_{ij})^2} \frac{1}{N_x N_y}}, \tag{8}$$

onde  $\phi_{ij}^a$  é a variável analítica,  $\phi_{ij}$  é a variável calculada numericamente nos índices  $ij$ . Os parâmetros utilizados para as experimentações numéricas estão dispostos na Tab. 1.

Figura 2 - Fluxograma da solução do termo não linear



Fonte: o autor.

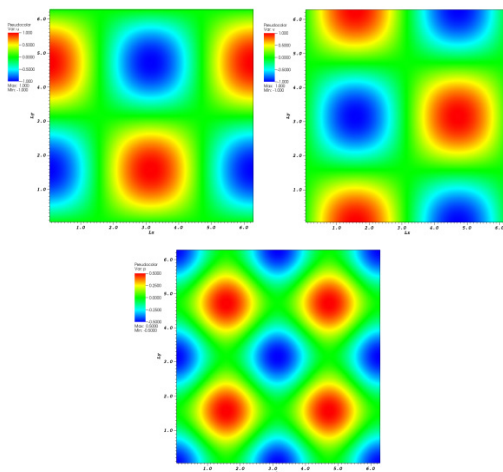
Tabela 1 - Parâmetro de simulação

Descrição	símbolos	unidades	valores
Dimensão do vórtice	L	m	$\pi$
Velocidade máxima	uo	m/s	1,0
Dimensão do domínio	Lx; Ly	m	$2\pi$
Massa específica	$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	1,0
Número de Reynolds	Re	-	100
Número de pontos de colocação	Nx; Ny	-	16,32,64,128, 256,512
Número de Courant	CFL	-	0,01
Tempo final de simulação	T uo/L	-	0,3

Fonte: o autor.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 4 está representada a condição inicial da solução analítica implementada, sendo que na coloração avermelhada, estão os máximos valores dos vórtices, 1,0 m/s, e na coloração azulada estão os vórtices com valores mínimos de -1,0 m/s. Nesta figura fica evidente a condição de contorno periódica em ambas as direções do domínio.

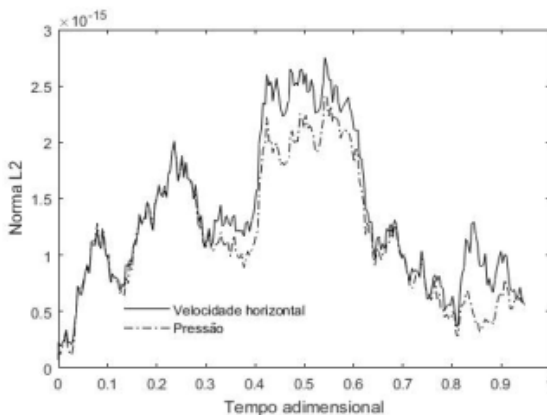
Figura 4 - Campos de velocidades e pressão, em  $t = 0$ 

Fonte: o autor.



Na Figura 5 está o valor do erro obtido pela norma  $L_2$ , para as variáveis velocidade horizontal e pressão. Nota-se que, o erro apresentado para a variável velocidade e para a variável pressão possuem o mesmo comportamento atingindo valores máximo de aproximadamente  $10^{-15}$ , denominado de erro de máquina.

Figura 5 - Norma  $L_2$  utilizando o método pseudoespectral de Fourier



Fonte: o autor.

## 4. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresenta um estudo do método pseudoespectral de Fourier, para solução da equação de conservação da quantidade de movimento linear e para conservação da massa, para propriedades constantes, num regime transiente e bidimensional. Tal estudo utilizou solução analítica proposta por Taylor-Green objetivando a aprendizagem e manipulação do código bidimensional IMERSPEC2D.

Com base nos resultados obtidos pelo presente trabalho pode-se concluir que o método pseudoespectral de Fourier possui alta acurácia quando utilizado para solução de funções suaves e com condições periódicas.

## 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à instituição FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A., ao Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico da ANEEL pelo apoio financeiro, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica/UFG.

## REFERÊNCIAS

ABDELSAMIE, A. *et al.* The Taylor-Green vortex as a benchmark for high-fidelity combustion simulations using low-mach solvers. **Computers Fluids**, v. 223, p. 1-19, 2021.

CANUTO, C.; QUARTERONI, A.; HUSSAINI, M. Y.; ZANG, T. A. **Spectral Methods-Fundamentals in Single Domains**. New York, Springer, 2006.

HERNÁNDEZ, J. E. R. **Aplicação de um Esquema Convectivo de Baixa Difusão Numérica em escoamentos com Alta Recirculação**. 2006. (Doutorado em Engenharia Oceânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.

MALISKA, C. R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editoras S.A., 1995.

MARIANO, F. P. **Soluções numéricas de Navier-Stokes utilizando uma hibridação das metodologias fronteira imersa e pseudoespectral de Fourier**. 2011 (Doutorado em Engenharias) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, 2011.

NASCIMENTO, A. A. **Métodos pseudoespectral de Fourier e fronteira imersa aplicados a escoamentos simplificados de engenharia de perfuração**. 2016. 190 p. Tese (Doutorado em Engenharias) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, 2016.

SOUZA, A. M. **Análise numérica da transição à turbulência em escoamentos de jatos circulares livres**. 2005, 208 f. (Doutorado em Engenharias) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, 2005.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics the Finite Volume Method**. England: Ed. Longman Scientific e Technical, 1995.

# CONTROLE DA ALTURA DA CAMADA LIMITE ATRAVÉS DO ÂNGULO DE FLAPE

Cássia Silva de Azevedo Maia<sup>1</sup> (csacassia@gmail.com)

Felipe Pamplona Mariano<sup>1</sup> (fpmariano@ufg.br)

<sup>1</sup>Universidade Federal de Goiás (UFG), Laboratório de Engenharia Térmica e de Fluidos (LATEF) - latef.emc@ufg.br

**Resumo:** A primeira etapa para o uso da energia eólica 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 geração de energia elétrica a partir da energia cinética dos ventos. Além disso, o conhecimento do regime de ventos local também é um parâmetro fundamental para determinar quais são as características necessárias das turbinas eólicas que devem ser instaladas naquele espaço. No presente trabalho é apresentada uma revisão bibliográfica a respeito de técnicas experimentais de geração de camada limite em túneis de vento para fins de estudo de potencial eólico. Além disso, são apresentados os primeiros experimentos de controle de camada limite no túnel de vento disponibilizado pelas FURNAS Centrais Elétricas, o experimento conta com o uso de uma placa plana que contém sondas de pressão instaladas e um mecanismo de flape instalado no bordo de fuga dessa placa. Os resultados obtidos mostram que, ao modificar o ângulo do posicionamento do flape, a camada limite gerada sobre a placa é alterada significativamente.

**Palavras-chave:** camada limite atmosférica; túnel de vento; escoamento sobre superfície plana.

## 1. INTRODUÇÃO

Devido às mudanças climáticas, está ocorrendo a diminuição do volume de chuvas anuais e conseqüentemente a seca de grandes reservatórios naturais e a geração de energia elétrica, proveniente de hidroelétricas, está comprometida no Brasil. A alternativa mais célere encontrada para resolver esse problema foi recorrer ao uso de usinas termoeletricas, as quais geram energia elétrica através da queima de combustíveis fósseis, especificamente, derivados de petróleo e carvão. Por outro lado, recorrer ao uso de termoeletricas, além de outros malefícios, gera um aumento no efeito estufa e, como resultados negativos, tem-se o aumento da temperatura global e agrava o problema de redução do volume de chuvas. Observa-se que, em breve, mais usinas termoeletricas terão que ser conectadas ao sistema de energia do país. Logo, para impedir que esse ciclo de aquecimento e destruição do meio ambiente continue, há a necessidade de se investir em energias limpas e renováveis. Uma das opções mais promissoras é a energia eólica, energia provinda dos ventos, considerada uma fonte de energia limpa e renovável.

Prever o potencial eólico de uma determinada região é uma tarefa importante do ponto de vista 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, escolher (adquirir) e posicionar (construir torres) uma turbina ou parque eólico dependem fundamentalmente do regime de ventos específicos daquela região.

Além disso, mesmo que em terrenos vistos na proporção de mesoescala não tenham ventos constantes e com potencial eólico médio, sabe-se que localmente (microescala) existem relevos de geografia específica que favorecem a formação de ventos mais

estáveis e aumentam pontualmente o potencial eólico em um determinado terreno. Os estudos na área abrangem desde projetos de turbinas até análises de potencial eólico nos terrenos de interesse. E para isso, pesquisas nas áreas de eficiência de turbinas, estimativa de potencial eólico e produção maximizada de parques eólicos são necessárias. É importante destacar que a primeira etapa para o uso da energia eólica é conhecer o potencial eólico do local onde se pretende instalar uma turbina ou mesmo um parque eólico. E também, o conhecimento do potencial eólico em um terreno influencia diretamente nas decisões das empresas, já que a aquisição correta de terrenos e turbinas eólicas específicas para um dado regime de vento local produz energia elétrica com boa qualidade de forma a aumentar os índices de continuidade.

Os testes para a obtenção de potencial eólico podem ser feitos em campo, ou utilizando a Dinâmica dos Fluidos, podendo ser numérica-computacional ou experimental. Conan *et al.* (2016) acrescenta que as medições em campo são limitadas a locais esparsos que podem não refletir as condições de todo o local. Isto é particularmente verdadeiro em terrenos complexos. Portanto, na escala de um grande parque eólico, outras ferramentas são necessárias.

Os testes experimentais abrangem os túneis de vento, que podem ser definidos como equipamentos experimentais que utilizam o princípio do movimento relativo entre o fluido e o modelo imerso. Além disso, são projetados para desenvolver um escoamento artificial, que modela a corrente livre, a qual deve ter velocidade constante ao longo do tempo e em toda área transversal de entrada da seção de testes, ou seja, a distribuição da velocidade ao longo da área da seção transversal e do tempo é um dos parâmetros mais importantes na qualidade do escoamento para se

ter confiabilidade nos resultados experimentais em túnel de vento. Contudo, para chegar a bons resultados, é importante simular de maneira correta a camada limite atmosférica (CLA) nos túneis de vento. Para isso, vários estudos já foram realizados demonstrando as diversas técnicas utilizadas para o desenvolvimento e controle da CLA em diferentes tipos de terrenos para túneis de vento de diferentes tamanhos e modelos. Logo, o objetivo do presente trabalho é desenvolver um método experimental para controlar a altura da CLA dentro da seção de testes do túnel de vento disponível, para simular diferentes condições de vento.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA: CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA

O físico alemão Ludwig Prandtl foi o primeiro a conceber a ideia da camada limite como sendo uma região muito fina e adjacente à superfície do corpo onde os efeitos viscosos são muito importantes (FOX *et al.*, 2014). Sendo que, fora da camada limite, o fluido se comporta como se fosse um fluido invíscido. No escoamento terrestre a região que ocorre os fenômenos meteorológicos é a troposfera, a qual se estende do solo até uma altura aproximada de 11 km, e é subdividida em atmosfera livre e camada limite. A camada limite, atinge uma altura, aproximadamente de 2,0 km a partir do solo, devido à influência da superfície terrestre, sendo denominada Camada Limite Atmosférica (CLA) (STULL, 1988). Conhecida também como camada limite planetária, a CLA pode ser definida como uma fina camada adjacente à superfície do terreno em que o escoamento apresenta um elevado número de Reynolds, onde a turbulência gera transporte de energia, massa e quantidade de movimento entre a superfície e a atmosfera.

Já para Fontella (2014), a CLA é uma camada de ar que cobre a terra na qual o escoamento de ar é influenciado pela viscosidade. Scotton (2020) complementa afirmando que as massas de ar, ao se aproximarem da superfície terrestre, têm suas propriedades (físicas) modificadas, bem como a sua velocidade.

Mattuella *et al.* (2016) explica que a avaliação do potencial eólico de uma região requer trabalhos sistemáticos de coleta e análise de dados sobre a velocidade e o regime de ventos. Um dos componentes mais importantes na análise de um parque eólico consiste no conhecimento da potência do vento. Caso essa etapa não seja realizada corretamente, além do investimento tornar-se inviável do ponto de vista econômico e financeiro, pode colaborar para erros na previsão da geração de energia. Desta forma, para avaliação deste potencial eólico pode-se utilizar as coletas de campo ou recorrer a Dinâmica dos Fluidos Computacional ou Experimental.

A análise experimental consiste na utilização de túneis de vento em que se faz a simulação da CLA, coletando dados de velocidade e intensidade turbulenta. Essa simulação pode ser feita de diversas formas. De acordo com Barbosa (2018), várias técnicas têm sido usadas para engrossar artificialmente a camada limite. Exemplos típicos são o uso de cercas, grades uniformes, grades graduadas ou cisalhadas, jatos, pulsação, rugosidade da parede, degraus, telas, geradores de vórtices e estratificação térmica.

Para Pires *et al.* (2013), os métodos de simulação da CLA em túneis de vento podem ser divididos em tipos passivos e ativos. Os métodos passivos utilizam barreiras como grades, placas planas, placas triangulares, blocos de escrever, pináculos, tapetes etc. Os métodos ativos são aqueles que utilizam jatos de ar comprimido inseridos de forma transversal na entrada da seção de testes, para formar uma parede de fluido.

Efthimiou *et al.* (2019) propôs um estudo que aborda o uso de um modelo de previsão de probabilidades de velocidades do vento na camada limite atmosférica, sendo este validado por experimento em túnel de vento de camada atmosférica. O autor enfatiza que a previsão precisa das probabilidades de velocidade do vento na camada de superfície atmosférica é muito importante para estudos de avaliação de energia eólica e muitas outras aplicações práticas, como projeto e operação de turbinas eólicas e exposição humana aos extremos do vento.

Kamada *et al.* (2019) apresentou em seu estudo a estrutura turbulenta do fluxo de ar do campo de escoamento em torno de um modelo de colina bidimensional colocado em um fluxo de camada limite com experimento em túnel de vento. Para avaliar o efeito natural do vento no modelo proposto por meio de experimentos em túnel de vento, uma grade de turbulência ativa gera o fluxo turbulento e um quadro de geração de camada limite reproduzindo a distribuição vertical da camada limite atmosférica foram instalados no do túnel. Os experimentos foram realizados em túnel de vento considerado pequeno, de comprimento 5,1 m e seção de testes com 0,60 m x 0,60 m de seção transversal, atingindo velocidade de 35 m/s. As investigações de campo de escoamento foram realizadas usando um PIV. Já o escoamento turbulento gerado pelas grades de turbulência ativa foi medido com um sistema de anemômetro de fio quente do tipo temperatura constante MiniCTA com uma sonda de fio quente do tipo X (fio de tungstênio banhado a platina). O modelo de colina foi feito de duralumínio, era uma forma de colina bidimensional comum com altura de 200 m modelada na escala 1/4000.

Mattuella *et al.* (2016) investigou a intensidade de turbulência média na camada limite atmosférica com um sistema de anemometria de fio quente. O artigo apresentou também uma revisão

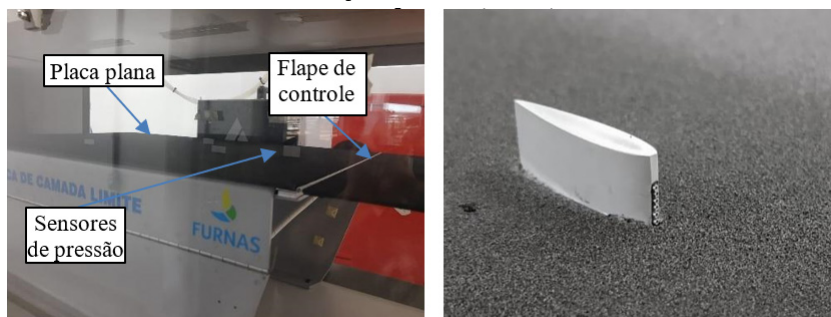


da contribuição que os túneis de vento têm feito recentemente para a modelagem física de ambos o campo de velocidade e a intensidade de turbulência como metodologia para o estudo da camada limite atmosférica em um terreno complexo, descrevendo uma simulação experimental da camada limite atmosférica em um túnel de vento sobre uma área complexa para caracterizar o fluxo médio (descolamento e recolamento) e a intensidade da turbulência com ênfase na produção de energia eólica. A área simulada está localizada no estado do Espírito Santo – Brasil, compreendendo um morro principal com declive de  $34^\circ$ , circundado por vários outros mais baixos. O modelo foi construído em uma escala de 1:1000. A camada limite atmosférica foi simulada com a utilização de dois tipos de métodos: rugosidade e barreira. O primeiro empregava blocos de madeira que cobriam o piso do túnel e o segundo placas triangulares perfuradas na entrada da câmara de teste. O experimento empregou duas categorias de terreno: terreno liso e moderadamente áspero. Os perfis de vento foram correlacionados para mostrar as mudanças da velocidade e demonstrar a extensão da esteira de turbulência causada pela topografia variável da área. Com base nos resultados experimentais, eles sugeriram que o coeficiente de potência da turbina eólica localizada na descida era maior do que o do terreno plano. No entanto, as cargas de fadiga atuantes nas turbinas eólicas também foram aumentadas. Os resultados demonstraram que o perfil de velocidade e o perfil de intensidade de turbulência variam significativamente ao longo da área complexa, o que torna necessária uma avaliação experimental precisa para certificar o layout de microrregiões. As perdas de energia devido aos efeitos de esteira podem facilmente atingir 20% da energia total, o que pode tornar uma planta inviável.

### 3. METODOLOGIA

No presente trabalho utiliza-se o túnel de vento de circuito aberto, subsônico, disponibilizado por FURNAS, o qual tem seção de testes com área transversal de 0,46 m x 0,46 m e 1,1 m de comprimento, podendo atingir velocidade de até 30 m/s. Na seção de testes é inserido o aparato experimental denominado placa plana de camada limite, vide Fig. 1.

Figura 1 - Placa plana para estudo de desenvolvimento de camada limite: posicionada no interior da seção de testes do túnel de vento (esquerda), detalhe dos sensores de pressão (direita)



Fonte: o autor.

Esta placa tem sensores de medida de pressão total ( $P_{total}$ ) distribuídos ao longo do comprimento da placa (Fig. 1 direita) e no bordo de fuga encontra-se um mecanismo do tipo flape (Fig. 1 esquerda), o qual possibilita alterar o ângulo efetivo do escoamento sobre a placa. Também se usa um tubo de Pitot, com a tomada de pressão total fechada e a tomada de pressão estática ( $P_e$ ) aberta, posicionado acima dos sensores de pressão. Dessa forma, tem-se, aproximadamente, a pressão total e a pressão estática, em alguns pontos da seção de testes do túnel de vento. Com esses valores, utilizando a equação de Bernoulli (Eq. 1) sobre uma linha de corrente que atinge um sensor:

$$\frac{P_{total}}{\rho g} = \frac{P_e}{\rho g} + \frac{V^2}{2g}, \quad (1)$$

onde  $g$  é a gravidade, adotada como  $9,81 \text{ m/s}^2$ ,  $\rho$  é a massa específica do ar, em  $\text{kg/m}^3$ , obtida a partir da temperatura e umidade do ar providas de sensores inseridos no interior do túnel de vento e  $V$  é a velocidade média do escoamento, em  $\text{m/s}$ .

Organizando a Eq. 1, obtém a velocidade do escoamento provinda de um sensor da placa plana:

$$V = \sqrt{\frac{2(P_{total} - P_e)}{\rho}}. \quad (2)$$

O procedimento experimental consiste basicamente em obter a pressão total de cada sensor e a pressão estática provinda do tubo de Pitot, para diferentes velocidades de escoamento e diferentes ângulos de posicionamento do flape.

Primeiramente, posiciona-se o flape em um determinado ângulo de ataque, então liga-se o túnel de vento em uma determinada velocidade. Espera-se, pelo menos, 120 s para garantir que o escoamento se torne estatisticamente permanente, aciona-se o modo de aquisição de pressão, o qual tem taxa de aquisição de 0,30 Hz, por, pelo menos, 120 s. Desliga-se o túnel de vento, ajusta-se um novo ângulo para o flape, uma nova velocidade e realiza-se novamente o experimento. Este experimento é realizado para os valores de ângulo de flape de  $-20^\circ$ ,  $-10^\circ$ ,  $+10^\circ$  e  $20^\circ$  e velocidades, em  $\text{m/s}$ , de 5,0, 10, 15, 20, 25 e 30.

Para cada experimento é obtida uma tabela com os dados de pressão total e estática obtidos ao longo dos 120 s de aquisição, ou seja, aproximadamente, 360 dados adquiridos pelos sensores de pressão. No presente trabalho, são apresentados os dados de 8 sensores alinhados verticalmente, posicionados próximo ao bordo de fuga da placa plana.

## 4. RESULTADOS

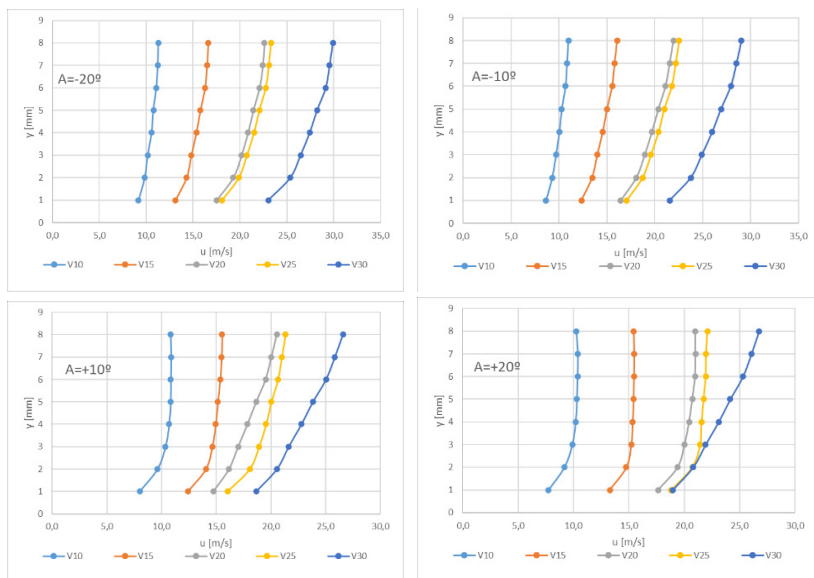
Como resultados, calcula-se a média das 360 medições de pressões total e estática obtidas ao longo do tempo de aquisição. Utiliza-se, então, os resultados médios de pressões na Eq. (2), convertendo-os em velocidade média (no tempo) em um determinado ponto do escoamento sobre a placa plana. Essa conta é feita para as 24 medições (4 ângulos e 6 velocidades) nas diferentes 8 posições ao longo da vertical.

Dessa forma, consegue-se agrupar os resultados nos gráficos da Fig. 2, onde são apresentadas as curvas de velocidade média (no tempo) ao longo das diferentes posições verticais ( $y$ ) dos sensores.

É possível observar que, para ângulo de flape positivos ( $+10^\circ$  e  $+20^\circ$ ), a altura da camada limite fica definida para velocidades menores, podendo-se estimar diretamente a altura da mesma. Entretanto, para ângulos de flape negativos ( $-20^\circ$  e  $-10^\circ$ ) a camada limite ainda está em desenvolvimento, uma vez que o perfil de velocidade média ainda não se estabilizou em uma determinada velocidade.

Outro resultado importante é a variação da velocidade, quanto mais baixa a velocidade, melhor é definida a camada limite. Para velocidades mais altas, mesmo com ângulo de flape positivo alto ( $+20^\circ$ ) a camada limite não pode ser determinada para a velocidade média de 30 m/s.

Figura 2 - Distribuições de velocidade média ao longo dos sensores de aquisição de pressão, para diferentes ângulos de posicionamento do flape da placa plana



Fonte: o autor.

## 5. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou uma revisão bibliográfica sobre Camada Limite Atmosférica e formas de controlá-la em túneis de vento. Como aplicação utilizou-se o método de mudança do ângulo de flape para verificar se é possível alterar a altura da camada limite no túnel de vento disponibilizado por FURNAS.

Como resultado principal, no método adotado, observa-se a interação entre o ângulo do flape com a formação da camada limite, sendo perceptível a diminuição da camada limite para ângulos positivos e o aumento da camada limite para ângulos negativos. Além disso, é possível verificar que, para velocidades mais altas a camada limite fica mais alta, como esperado para escoamentos mais turbulentos.

Por fim, os desenvolvimentos continuam e pretende-se demonstrar a influência do ângulo de flape para outras posições ao longo do comprimento da placa e gerar um mecanismo de mudança automática do ângulo do flape. De tal forma que seja possível fazer um controle direto da altura da camada limite, representando de forma mais próxima os efeitos do vento.

## 6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FURNAS Centrais Elétricas e ao Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico (P&D) da ANEEL pela infraestrutura e suporte financeiro disponibilizados para a realização do presente trabalho.

## REFERÊNCIAS

- BARBOSA, I. R. S. **Estudo da Variabilidade e Comparação dos Métodos de Estimativa da Camada Limite Atmosférica na Amazônia Central**. 2018. 87 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, 2018.
- CONAN, B.; CHAUDHARI, A.; AUBRUN, S.; VAN BEECK, J.; HÄMÄLÄINEN, J.; HELLSTEN, A. Experimental and Numerical Modelling of Flow over Complex Terrain: The Bolund Hill. **Boundary-Layer Meteorol**, v. 208, p. 158-183, 2016.
- EFTHIMIOU, G. C.; KUMAR P.; GIANNISSI, S. G.; FEIZ, A.A.; ANDRONOPOULOS, S. Prediction of the wind speed probabilities in the atmospheric surface layer. **Renewable Energy**, v. 132, p. 921-930, 2019.
- FONTELLA, C. R. F. **Análise Numérica do escoamento Turbulento em Área Urbana Empregando Simulação de Grandes Escalas**. 2014. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2014.

KAMADA, Y.; QING'AN L.; MAEDA, T.; YAMADA, K. Wind tunnel experimental investigation off flow field around two-dimensional single hill models. **Renewable Energy**, v. 136, p. 1107-1118, 2019.

FOX, R. W.; MCDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 8. ed. São Paulo: Grupo Editorial Nacional, 2014.

MATTUELLA, J. M. L.; LOREDO-SOUZA, A. M.; OLIVEIRA, M. G. K.; PETRY, A. P. Wind tunnel experimental analysis of a complex terrain micro-siting. **Renewable and Sustainable Energy Review**, v. 54, p. 110-119, 2016.

PIRES, L. B. M.; BRAGA de PAULA, I.; FISCH, G.; GIELOW, R.; GIRARDI, R. M. Simulations of the Atmospheric Boundary Layer in a Wind Tunnel with Short Test Section. **Journal Aerospace Technology Management**, v. 5, n. 3, p. 305 - 314, 2013.

SCOTTON, J. A. **Determinação Experimental em Túnel de Vento das Velocidades Incrementais sobre Morros e Taludes**. 2020. 256 f. Tese (Doutorado em Engenharia) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2020.

STULL, R. B. **An introduction to boundary layer meteorology**. Germany: Springer Science & Business Media, 1988. ISBN 9027727686.

ZHENG, K.; TIAN, W.; QIN, J.; HUI, H. An experimental study on the turbulent flow over two-dimensional plateaus. *In: WIND ENERGY SYMPOSIUM, 2018, Kissimmee. Proceedings [...]*, Kissimmee (USA), 2018.

# ESCOAMENTO SOBRE CILINDRO CIRCULAR LISO ESTÁTICO

Douglas Neves Nascentes<sup>1</sup> (douglasnevesnascentes@hotmail.com)  
Felipe Pamplona Mariano<sup>1</sup> (fpmariano@ufg.br)

<sup>1</sup>Universidade Federal de Goiás (UFG), Laboratório de Engenharia Térmica e de Fluidos (LATEF) - latef.emc@ufg.br

**Resumo:** O presente trabalho trata de escoamentos sobre um cilindro circular liso estático submetido a diferentes números de Reynolds. Cilindros circulares são um dos corpos rombudos que apresentam características hidrodinâmicas mais estudadas e conhecidas, sendo de extrema importância para o desenvolvimento de processos de validação e calibração de equipamentos. O presente trabalho abrange uma revisão bibliográfica sobre as características do escoamento sobre cilindro, como por exemplo formação da camada limite, faixas de transição e forças atuantes.

**Palavras-chave:** escoamento sobre cilindros; força de arrasto; número de Reynolds.



## 1. INTRODUÇÃO

Quando submetido a um escoamento, o cilindro circular é um dos corpos rombudos que apresentam maior quantidade de estudos e pesquisas relacionadas, sendo de grande valia para o aprendizado de características físicas importantes de escoamentos sobre objetos e proporciona resultados para serem utilizados em processos de validação de códigos computacionais e calibração de túneis de vento e outros aparatos. Com isso, é uma das maneiras de se estudar e compreender os fenômenos físicos abrangentes, para uma possível expansão e aplicabilidade em outros corpos.

O intuito desse trabalho é expor teoricamente os fenômenos físicos que ocorrem em um cilindro imerso em um escoamento, fazendo uma ligação à aplicabilidade deste escoamento no túnel de vento localizado nas instalações da Universidade Federal de Goiás (UFG).

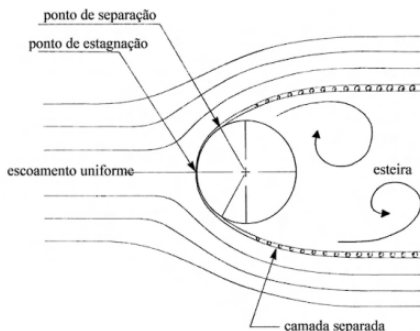
## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Quando um cilindro circular liso estacionário é submetido a um escoamento transversal, surge a camada limite a partir do ponto de estagnação. Esta camada, advinda dos efeitos difusivos e dissipativos de energia mecânica, aumenta conforme a elevação do número de Reynolds até a formação de um escoamento reverso, gerando a separação do escoamento de forma simétrica nos dois lados do corpo, que forma duas camadas cisalhantes na região da esteira, com sinais opostos e determinantes para a formação das estruturas turbilhonares. Na Fig. 1, é ilustrado o que foi descrito.

Uma estrutura turbilhonar, quando formada, cresce de forma proporcional ao recebimento de energia da camada cisalhante,

até que esta energia seja suficientemente grande para a formação de uma camada cisalhante no sentido oposto.

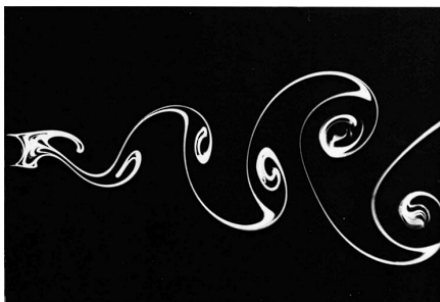
Figura 1 - Escoamento em torno de um cilindro circular



Fonte: DALY (1986).

Conforme aumenta o número de Reynolds, a camada limite se desenvolve e conseqüentemente as instabilidades na região da esteira aumentam, tornando perceptível a formação e propagação periódica dos vórtices de Von Kármán, que estão ilustrados na Fig. 2:

Figura 2 - Propagação dos vórtices de von Kármán

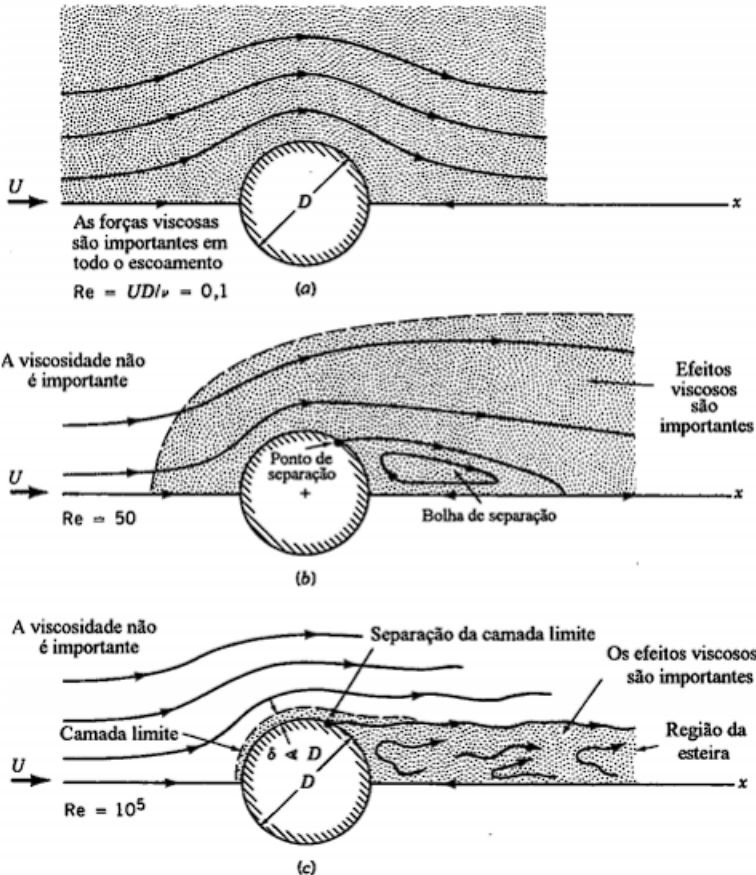


Fonte: DALY (1986).

O número de Reynolds ( $Re$ ) é um número adimensional que expressa a relação entre os efeitos de inércia e os efeitos viscosos de um escoamento. Com  $Re$  muito baixos, geralmente há uma

maior associação a escoamentos com maior predominância das forças viscosas, e para  $Re$  maiores, tem-se uma menor predominância viscosa no escoamento, levando à incapacidade de manter o escoamento laminar, causando a transição para a turbulência. Na Fig. 3 é representado a interação entre as forças viscosas e inerciais em um escoamento sobre um cilindro para diversos números de Reynolds.

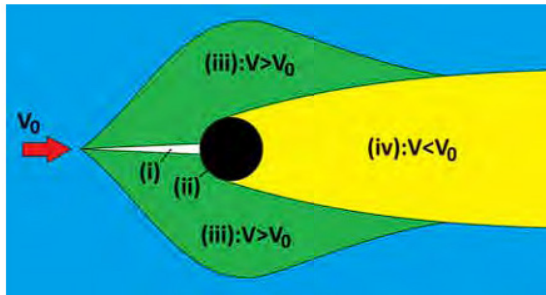
Figura 3 - Interação do número de Reynolds no escoamento de um cilindro circular



Fonte: MUNSON (2004).

O escoamento ao redor de um cilindro pode ser dividido e caracterizado em 4 regiões, vide Fig. 4. A região (i) é caracterizada por uma área estreita de escoamento desacelerado, que engloba o ponto de estagnação. A região (ii) é representada pelo surgimento de duas camadas limites na superfície do cilindro. A região (iii) é representada por dois espaços de deslocamento e aceleração do escoamento, com velocidades superiores à inicial do escoamento antes de encontrar o cilindro. Finalmente, a região (iv), que é a de separação, à jusante do escoamento, com desaceleração, denominada esteira.

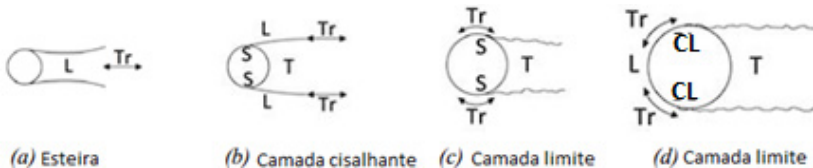
Figura 4 - Regiões do escoamento



Fonte: FONSECA (2013).

Para esse tipo de escoamento, o desenvolvimento para a transição ocorre em três regiões distintas perturbadas, que são: esteira, camada cisalhante e camada limite, conforme Fig. 5.

Figura 5 - Transição nas regiões perturbadas (CL=camada limite, L=laminar, T=turbulento, TR=transição, S=separação)



Fonte: FONSECA (2013).

As transições são sensíveis a perturbações de diversos tipos: turbulência, bloqueio de parede, rugosidade superficial, proximidade de parede, etc. A maioria destas perturbações estão presentes no túnel de vento, e é importante que sejam reduzidas para não comprometer os dados obtidos do experimento.

Escoamentos laminares podem ser divididos em três regimes: “creeping flow”, separação permanente e periódico laminar. O primeiro é caracterizado como um escoamento lento, sendo incapaz de formação de esteira visível, com  $0 < Re < 5$ . O segundo possui característica permanente e com separação simétrica, possuindo a faixa  $4 < Re < 48$ . O último, apresenta o início de uma esteira instável com  $48 < Re < 200$ . À medida que o número de Reynolds for aumentando, a esteira se torna mais instável.

A transição na esteira pode ser dividida em dois regimes, transição de vórtices laminares na esteira e transição de vórtice irregular durante sua formação, em que o primeiro apresenta faixa  $180 < Re < 250$ , e o segundo de  $250 < Re < 400$ .

A transição ao longo da camada de cisalhamento pode ser dividida em três fases: desenvolvimento de ondas de transição, formação dos vórtices de transição e finalmente a turbulência.

A Fig. 6(a), representa o desenvolvimento das ondas de transição, que possui uma faixa de Reynolds de 400 a 2.000, onde aparecem as primeiras ondulações das camadas cisalhantes livres. A Fig. 6(b) representa a formação dos vórtices de transição, onde se inicia o enrolamento dos vórtices ao longo da camada cisalhante livre anterior, tornando o regime turbulento, com uma faixa de Reynolds entre 2.000 e 40.000. A Fig. 6(c) onde representa a transição para a turbulência na camada cisalhante livre do cilindro, com formação de vórtices próximo à parte posterior do cilindro, com faixa de Reynolds de 40.000 a 200.000.

Figura 6 - Transição ao longo da camada limite

(a)  $Re = 2\ 000$ (b)  $Re = 8\ 000$ (c)  $Re = 110\ 000$ 

Fonte: ZDRAVKOVICH (1997).

A última transição é composta por cinco regimes distintos, divididos em:

- Regime pré-crítico:  $10^5 - 2 \times 10^5 < Re < 3 \times 10^5 - 3,4 \times 10^5$
- Regime de uma recirculação:  $3 \times 10^5 - 3,4 \times 10^5 < Re < 3,8 \times 10^5 - 4 \times 10^5$
- Regime de uma recirculação:  $3,8 \times 10^5 - 4 \times 10^5 < Re < 5 \times 10^5 - 10^6$
- Regime supercrítico:  $5 \times 10^5 - 10^6 < Re < 3,5 \times 10^5 - 6 \times 10^6$
- Regime pós crítico:  $3,5 \times 10^5 - 6 \times 10^6 < Re < \textit{indefinido}$

É importante ressaltar que, na prática, não é um valor específico de Reynolds que irá determinar o escoamento em corpos imersos, e sim uma faixa, por isso há uma diferença entre os dados de cada autor. Como exemplo, a Tab. 1, elaborada por Schlichting (1979), apresenta de forma sucinta o caráter do escoamento ao redor de um cilindro circular.

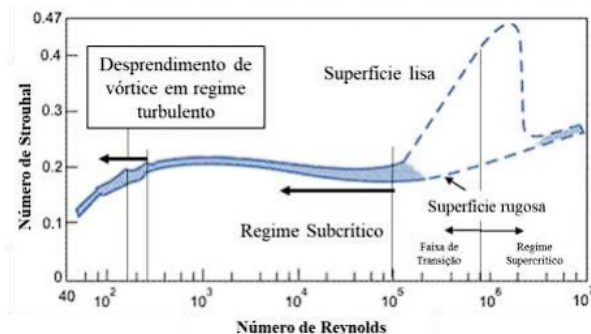
A frequência de desprendimento de vórtices é apresentada na forma adimensional como número de Strouhal, sendo definido como:

$$St = \frac{fD}{\bar{u}_\infty} \quad (1)$$

Em que  $f$  é a frequência de desprendimento de vórtices,  $D$ , para o caso do cilindro, é o diâmetro e o denominador representa a velocidade do escoamento. A relação entre os dois números,

para cilindros, está representada na figura 7, e é importante para inúmeras aplicações, como exemplo nas experimentações em túneis de vento, para determinação de ressonância da estrutura etc.

Figura 7 - Relação entre o número de Strouhal (St) e o número de Reynolds (Re) para cilindros circulares



Fonte: GOMES (2019).

Tabela 1 - Caráter do escoamento em torno de um cilindro imerso em função do número de Reynolds

Número de Reynolds	Regime de Escoamento	Formato do escoamento	Característica do escoamento
$Re \rightarrow 0$	Escoamento Lento (creeping flow)		Permanente, sem esteira
$3 - 4 < Re < 30 - 40$	Par de vórtices na esteira		Permanente, com separação simétrica
$30 < Re < 80$ $40 < Re < 90$	Formação de vórtices de von Kármán		Laminar, esteira instável
$80 < Re < 150$ $90 < Re < 300$	Pura esteira de vórtices de von Kármán		Vórtices de von Kármán
$150 < Re < 10^5$ $300 < Re < 1.3 \cdot 10^5$	Regime subcrítico		Laminar, com esteira de vórtices instável
$10^5 < Re < 3.5 \cdot 10^6$ $1.3 \cdot 10^5 < Re < 3.5 \cdot 10^6$	Regime Crítico		Separação Laminar Esteira turbulenta
$3.5 \cdot 10^6 < Re$	Regime Supercrítico (transcrítico)		Separação turbulenta

Fonte: Adaptado de SCHLICHTING (1979).

Outros fatores importantes a serem estudados são os coeficientes de arrasto do cilindro em função do Re e a curva de pressão em torno do cilindro em função do ângulo da tomada de pressão. O arrasto é uma força de resistência ao escoamento e é originada no atrito viscoso e na distribuição de pressão ao redor do objeto.

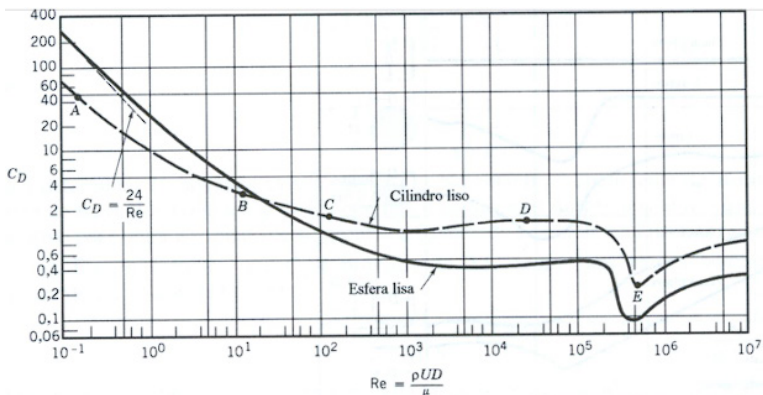
O coeficiente de arrasto pode ser calculado através da Eq. 2:

$$C_d = \frac{2F_x}{\rho U^2 A} \tag{2}$$

Em que  $F_x$  é a força de arrasto sobre o cilindro, que pode ser obtida experimentalmente em túneis de vento, por exemplo.  $U$  é a velocidade de entrada do escoamento,  $A$  é a área do cilindro vista pelo escoamento, ou seja, diâmetro “ $D$ ” multiplicado pelo comprimento “ $L$ ” e  $\rho$  a massa específica do fluido.

Na figura 8 tem-se o gráfico de distribuição do coeficiente de arrasto em função do número de Reynolds para o escoamento sobre cilindros. Nota-se que existe uma certa linearidade para número de Reynolds entre  $10^3$  até  $10^5$ , após isso sofre uma queda, chamada de crise do arrasto, que está relacionada com as propriedades da camada limite transicionar para a turbulência.

Figura 8 - Coeficiente de arrasto em função de Re para cilindros e esferas





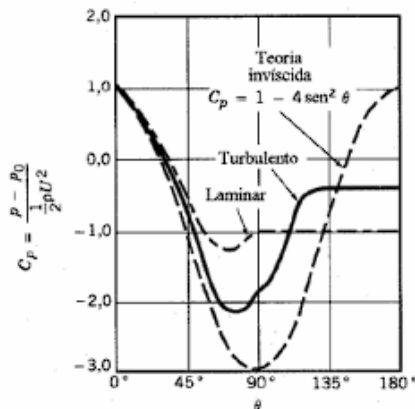
O coeficiente de pressão é outro parâmetro importante para o estudo de escoamento sobre cilindros, que pode ser expressa como:

$$C_p = \frac{P - P_0}{\frac{\rho U^2}{2}} \quad (3)$$

Em que  $P$  é a pressão total em cada ponto da superfície do cilindro, em função do ângulo,  $P_0$  é a pressão de referência, onde a atmosférica é a mais comum de ser utilizada para cálculos e experimentos, e  $\rho$  é a massa específica do fluido.

O coeficiente de pressão também pode ser associado com a força de arrasto. Na Fig. 9 é mostrada a distribuição do coeficiente de pressão em função do ângulo  $\theta$  do cilindro.

Figura 9 - Coeficiente de pressão em função do ângulo



Fonte: MUNSON (2004).

### 3. CONCLUSÕES

Escoamentos sobre cilindros circulares são fundamentais para a solidificação e reforço do conhecimento em mecânica dos fluidos e uma possibilidade de maior aprendizado prático, por ser um experimento bastante conhecido se torna mais simples a realização de ensaios e comparar os resultados obtidos com

o que já existe na literatura, inclusive possíveis parâmetros que possam ser utilizados para corrigir e tratar melhor o resultado.

Além disso, pode servir de base e validação para experimentos mais complexos, como escoamentos sobre um conjunto de cilindros, ou sobre cilindros basculantes, aerofólios, dentre outros.

#### 4. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FURNAS Centrais Elétricas, ao Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico (P&D) da ANEEL e à FAPEG pelo financiamento e apoio ao desenvolvimento do presente trabalho.

#### REFERÊNCIAS

DALY, A. F. **The response of chimneys to wind induced loads and the evaluation of the resulting fatigue damage**. 1986. 352 p. Ph.D. Thesis (Doctor of Philosophy) — University of Western Ontario, Ontario, Canadá, 1986.

FONSECA, F. B. **Estudo do Escoamento ao redor de Cilindros Elípticos**. 2013. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, São Paulo, 2013.

GOMES, T. F. **Estudo Numérico do Escoamento entre Cilindros dispostos lado a lado**: efeito da interação entre esteiras nos coeficientes aerodinâmicos e no desprendimento de vórtices. 2019. 101 f. Dissertação (Mestrado em Integridade de Materiais da Engenharia) — Programa de Pós-Graduação em Integridade de Materiais da Engenharia, Universidade de Brasília, 2019.

MUNSON, B. R. **Fundamentos da mecânica dos fluidos**. 4. ed. Tradução de Euryale de Jesus Zerbini. São Paulo: Edgard Blucher, 2004.

SCHLICHTING, H. **Boundary-Layer Theory**. 7. ed. New York; McGraw-Hill, 1979, 817 p.

ZDRAVKOVICH, M. M. **Flow around circular cylinders**: a comprehensive guide through flow phenomena, experiments, applications, mathematical models, and computer simulations. Oxford: Oxford University Press, 1997. v. 1: Fundamentals.

# REVISÃO SISTEMÁTICA SOBRE A UTILIZAÇÃO DE DADOS DA TELEMÁTICA E TÉCNICAS DE MACHINE LEARNING PARA REDUÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA (DIESEL) E EMISSÕES DE POLUENTES EM CAMINHÕES RODOVIÁRIOS

Fábio Ribeiro von Glehn<sup>1</sup> (fabioglehn@discente.ufg.br)

João Paulo da Silva Fonseca<sup>1</sup> (jpsfonseca@ufg.br)

Marlipe Garcia Fagundes Neto<sup>1</sup> (marlipe@ufg.br)

<sup>1</sup>Universidade Federal de Goiás (UFG), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGMEC)

**Resumo:** Este trabalho apresenta uma metodologia de busca por artigos na base Scopus que auxilie na solução de problemas de consumo de combustível e emissões de poluentes de caminhões rodoviários que almejam respostas em dados adquiridos por telemática veicular e análises nas estratégias de *machine learning*. Após a seleção dos artigos, foi criada uma estratégia de ranqueamento para leitura e classificação de cada artigo de acordo com os critérios de elegibilidade.

**Palavras-chave:** caminhões; consumo de combustível; manutenção; telemática; aprendizado de máquina.

## 1. INTRODUÇÃO

A motivação para este tipo de estudo advém de um panorama de consumo energético do Brasil no transporte de cargas publicado pela Agência Internacional de Energia (IEA) em 2021 [1]. Em linhas gerais, o estudo do IEA revela que os caminhões pesados consomem cerca de 60% da energia no transporte de cargas nos modais rodoviário, ferroviário e aquaviário no Brasil.

Estratégias que visem a redução do consumo energético neste modal tendem a impactar positivamente tanto a esfera econômica, como a ambiental. Entretanto entender e separar fatores significantes relacionados ao caminhão (tipo de carga – carregado ou vazio – tamanho, idade, marca, etc.), à infraestrutura (qualidade das estradas, qualidade do combustível, diversificação modal etc.), à gestão (planejamento de rota, controle de pneus, velocidade e manutenção, pontos de abastecimento, etc.) e ao motorista (estilo de direção, treinamento, experiência com o caminhão, conhecimento da rota, etc). Entender globalmente essas características demandam o uso de dados para estudos e, nesse aspecto, a telemática ganha significância como parte da solução.

Nos termos de Hu *et al.* (2022) [2]:

A telemática envolve enviar, receber e armazenar informações usando dispositivos de telecomunicação para controlar objetos remotos. Utilizando tecnologias sem fio atuais e sistemas computacionais, os dados de telemática veicular podem capturar várias características de um veículo em execução na estrada e geralmente podem ser usados não apenas como uma ferramenta de avaliação para veículos e motoristas individuais, mas também para avaliar os impactos ambientais do transporte urbano de carga em uma escala muito mais ampla.

A telemática é capaz de capturar dados de funcionamento dos veículos em quantidade tal, que a análise desses dados requer a introdução de outros conhecimentos científicos relacionados a *big data*, inteligência artificial e *machine learning*.

Os métodos de *machine learning* começam a ganhar relevância em publicações científicas a partir de 2015, quando superam o valor de 10 mil publicações, ultrapassam o termo inteligência artificial em 2018, com 30 mil publicações e em 2021 superam 80 mil publicações. Tal comportamento elucida a *machine learning* como uma área do conhecimento em expansão.

Neste contexto, o objetivo desta revisão sistemática será o de encontrar trabalhos científicos relevantes relacionados à eficiência energética (combustível) no transporte de cargas, em destaque para caminhões pesados (diesel), que busquem soluções na aquisição de dados pela telemática veicular e análise desses dados com técnicas computacionais conectadas à inteligência artificial, *machine learning*, *deep learning* e afins.

## 2. METODOLOGIA

Para este trabalho, utilizou-se a base de dados Scopus ([www.scopus.com](http://www.scopus.com)) para levantamento da literatura alinhada com as palavras chaves de interesse.

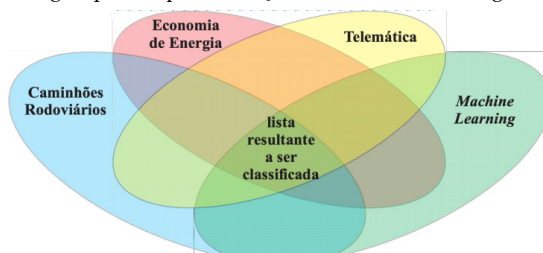
Fazendo uso da opção de busca avançada, quatro grupos separados pelo operador AND foram formados:

- A região limitante do problema: Caminhões rodoviários
- O problema que se quer estudar: Economia de energia
- Como os dados serão adquiridos: Telemática
- As técnicas de análise dos dados: *Machine Learning*

A Figura 1 ilustra a ideia de que cada um dos conjuntos acima listados será formado por uma lista de palavras relacionadas a cada um e o resultado será a intersecção desses conjuntos.

A Tabela 1 revela a quantidade de palavras utilizadas em cada grupo, uma lista de até nove palavras utilizadas e o tamanho da lista resultante caso o grupo seja pesquisado isoladamente (pesquisa realizada na base Scopus em 10/11/2022). Cabe ressaltar que Dynafleet, Geotab, Autotrac, SasCar e Omnilink são empresas que oferecem o serviço de telemática ao mercado de transportes e que utilizam a CANBUS ou a tomada de diagnóstico OBD do veículo para a leitura e captura do dado.

Figura 1 - Metodologia aplicada para a seleção inicial da lista de artigos a serem avaliados



Fonte: o autor.

Tabela 1 - Detalhamento de palavras-chave utilizadas em cada grupo admitido e respectivo resultado preliminar

Grupo	Quantidade palavras	Principais palavras separadas pelo operador OR	Quantidade do Conjunto isolado
Caminhões rodoviários	4	<i>truck heavy-duty vehicle fleet</i>	1.071.699
Economia de energia	6	<i>fuel consumption energy-saving emission repair maintenance</i>	4.960.717
Telemática	9	<i>telematic telematics OBD canbus dynafleet geotab autotrac sascar.</i>	8.057
<i>Machine Learning</i>	22	<i>"machine learning" "deep learning" "artificial intelligence" "neural network" "big data"</i>	2.623.477

Fonte: o autor.

O procedimento descrito para busca nos campos título, resumo e palavras-chave (TITLE-ABS-KEY), considerando a interseção

dos 4 grupos admitidos resultou em 178 documentos. Esse resultado foi salvo na própria plataforma em ‘My Scopus – Saved Searches’ como ‘Grupo 178’ e uma ação de alerta foi ativada caso ocorra alguma alteração nesse resultado de pesquisa a ser avaliado em frequência semanal. Os novos resultados poderão ser visualizados em ‘My Scopus – Alerts – Check for new results’.

### 2.1 Ranking decrescente do número de citações

Um critério de elegibilidade foi definido para avaliar se a ideia central de cada artigo CONVERGE ou DIVERGE do escopo esperado nesta revisão.

A partir dos 178 documentos iniciais, aplicou-se um ranqueamento por número de citações, em ordem decrescente, e cada *abstract* foi avaliado para classificação.

### 2.2 Ranking decrescente de indicadores SCOPUS

O método do ranking decrescente do número de citações pode apresentar o inconveniente de eliminar possíveis artigos publicados recentemente e que ainda não tiveram o tempo necessário para se destacarem. Pensando nisso, aplicou-se um segundo ranqueamento considerando o fator de impacto do periódico ao qual cada documento estava associado.

Então, identificou-se no resultado da lista original (178 documentos), quais seriam os trabalhos que possuem um ISSN vinculado.

Isso reduziu o número de trabalhos a 123, a partir dos quais levantou-se a informação de ISSN dessas publicações, o que resultou em um total de 73 periódicos com ISSN distintos.

Com a lista de ISSN, utiliza-se a aba ‘Sources’ do Scopus para levantamento dos indicadores Scopus de cada periódico. A lista foi salva em ‘My Scopus – Saved lists – Sources’ com o nome Lista 073 ISSN.

O Scopus retorna sete indicadores diferentes para a fonte: CiteScore, Highest Percentile, Citations, Documents, % Cited, SNIP e SJR. Além da possibilidade de ordenar o ranking em qualquer indicador, o Scopus traz ainda a área de atuação preferencial do periódico e a colocação dessa fonte dentro do ranqueamento daquela área.

### 2.3 Ranking decrescente de indicadores SJR

O ajuste pelo título do documento exigido pelo Scopus para vinculá-lo aos scores de sua fonte de publicação pode resultar em um trabalho cansativo e sujeito a erros do usuário. Uma alternativa interessante é fazer uso do ranking do Scimago Journal & Country Rank (<https://www.scimagojr.com/journalrank.php>).

A Figura 2 ilustra, parcialmente, a lista de artigos ordenados em função do Citescore do periódico fonte (na cor laranja). Além disso, é possível observar o número de citações (na cor verde), *highest percentile* (na cor azul), SJR (na cor vermelha) e H index (na cor azul claro), sendo que qualquer índice pode ser utilizado como preferencial.

Figura 2 - Detalhe do ranqueamento dos artigos com ISSN vinculado, em ordem decrescente de Citescore da fonte de publicação, ranking pelo Scopus e Scimago Journal & Country Rank

Ranking		Source title	Document Title	My_Class	Citations	Citescore	Highest Percentile	SJR	H Index
		Future Generation Computer Systems	Big data architecture for connected vehicles: Feedback and application examples from an automotive group	Divergente	0	18,70	0,9900	2,233	134
	15	IEEE Internet of Things Journal	TrajData: On Vehicle Trajectory Collection with Commodity Plug-and-Play OBU Devices	Divergente	15	17,10	0,9800	3,848	119
	4	Computers in Industry	Preventive maintenance for heterogeneous industrial vehicles with incomplete usage data	Divergente	4	16,90	0,9900	2,427	108
	5	Vehicular Communications	Fuzzy inference system design for promoting an eco-friendly driving style in IoV domain	Divergente	5	12,80	0,9500	2,062	41
	29	IEEE Transactions on Mobile Computing	Artemis: A Personal Driving Assistant for Fuel Saving	Divergente	29	12,60	0,9400	2,426	143
	0	Expert Systems with Applications	Predicting Vehicle Behavior Using Multi-task Ensemble Learning	Divergente	0	12,20	0,9700	2,070	225
	0	Engineering Applications of Artificial Intelligence	Interpretable machine learning models for predicting and explaining vehicle fuel consumption anomalies	CONVERGENTE	0	11,00	0,9200	1,734	114
	0	IEEE Transactions on Intelligent Vehicles	A Parallel Supervision System for Vehicle Emissions Based on OBD-Independent Information	Divergente	0	10,90	0,9700	1,678	31
	1		Deep Learning Model Based CO2 Emissions Prediction using Vehicle Telematics Sensors Data	Divergente	1	10,90	0,9700	1,678	31

Fonte: o autor.



### 3. RESULTADOS

#### 3.1 O mais citado

Título: “Industrie 4.0” and smart manufacturing-a review of research issues and application examples.

Autores: Thoben, K.-D. and Wiesner, S.A. and Wuest, T.

Ano da publicação: 2017

Quantidade de citações: 608 (1/178)

Journal: International Journal of Automation Technology

Categoria: Industrial and Manufacturing Engineering (Q3);  
Mechanical Engineering (Q3)

Citescore:1,5      HP: 39%      SNIP: 0,622      SJR: 0,28

H index: sem inform.

O objetivo do artigo é fornecer uma visão geral dos programas da Indústria 4.0 e manufatura inteligente.

O artigo foi classificado como divergente, porque o foco deste artigo é analisar as aplicações e desafios do uso de dados na indústria em geral.

Por ordenação de citação o primeiro arquivo de interesse convergente foi o quarto ranqueado e a ficha resumo deste é apresentada no item 3.3, porque foi o primeiro a relacionar o uso de dados para economia de combustível em caminhões.

#### 3.2 O artigo publicado no jornal com maior citescore

Título: Big data architecture for connected vehicles: Feedback and application examples from an automotive group. [5]

Autores: Mostefaoui, A. and Merzoug, M.A. and Haroun, A. and Nassar, A. and Dessables, F.

Ano da publicação: 2022

Quantidade de citações: 0 (118/178)

Journal: Future Generation Computer Systems

Categoria: Computer Networks and Communications (Q1);  
Hardware and Architecture (Q1); Software (Q1)

Citescore: 18,7      HP: 99%      SNIP: 2,699      SJR: 2,233

H index: 134

Os autores apresentam tecnologias e produtos de código aberto utilizados em diferentes componentes de uma plataforma de veículos conectados (CV) para reunir, armazenar, processar e alavancar *big data* automotivo.

O artigo foi classificado como divergente, porque este artigo trata dos problemas que surgirão com a enormidade de dados a serem capturados, armazenados e processados quando os veículos começarem a se comunicar entre si, o que diverge das nossas expectativas em relação ao uso de dados para economia de combustível no transporte rodoviário.

Nesta sequência, o primeiro artigo de interesse convergente foi o nono de maior Citescore. E na ordenação decrescente por SJR o primeiro convergente era o décimo quarto, pelo motivo de que nessa sequência, foi somente o décimo quarto da lista a se conectar com o uso de dados para economia de combustível no transporte rodoviário.

### 3.3 Artigos classificados como convergentes

Os dois critérios de classificação que envolveram os rankings das publicações não se mostraram muito eficientes porque em ambos os casos, os artigos publicados pelos *journals* com melhor pontuação não se mostraram alinhados com as expectativas desta revisão. Considerando isso, partiu-se para uma análise individual dos 178 *abstracts* e chegou-se a um número de 17 artigos dentre os quais destacam-se dois:

Título: A deep learning method for monitoring vehicle energy consumption with GPS data. [6]

Autores: Ko, K. and Lee, T. and Jeong, S.

Ano da publicação: 2021

Quantidade de citações: 0 (134/178)

Journal: Sustainability (Switzerland)

Categoria: Geography, Planning and Development (Q1); Energy Engineering and Power Technology (Q2); Environmental Science (miscellaneous) (Q2); Management, Monitoring, Policy and Law (Q2); Renewable Energy, Sustainability and the Environment (Q2)

Citescore: 5,0

HP: 86%

SNIP: 1,31

SJR: 0,664

H index: 109

O artigo propõe um método de monitorização da energia consumida nos veículos, a partir de dados do GPS e do conector OBD do veículo. Pelo GPS mede-se a velocidade do veículo, taxa de aceleração e inclinação da estrada, e pelo conector OBD obtém-se o consumo de combustível. Os parâmetros são treinados em 5 camadas com uma técnica de *deep-learning* com uma típica abordagem de classificação.

O artigo foi classificado como de interesse convergente, porque ao monitorar o consumo de energia e relacionar isso com dados obtidos no funcionamento do veículo vai ao encontro direto do que se busca nesta revisão bibliográfica: artigos que relacionem o uso de dados para economia de combustível e por consequência redução de emissão de gases poluentes.

Título: Methodology to Recognize Vehicle Loading Condition - An Indirect Method Using Telematics and Machine Learning. [7]

Autores: Venugopal V., Raj Bob P., Nair V.

Ano da publicação: 2019

Quantidade de citações: 0 (157/178)

Journal: SAE Technical Papers

Categoria: Automotive Engineering (Q3); Industrial and Manufacturing Engineering (Q3); Pollution (Q3); Safety, Risk, Reliability and Quality (Q3)

Citescore: 0,0 HP: 0% SNIP: 0 SJR: 0 H index: sem inform

O artigo explora a possibilidade de detecção das condições de carga do veículo sem fazer uso de quaisquer sensores. Em vez disso, um modelo de aprendizagem de máquina é desenvolvido para reconhecer a condição de carga em tempo real, analisando o comportamento de condução do veículo.

O artigo foi classificado como de interesse convergente, porque um dos principais fatores que afetam o consumo de combustível é a massa a ser transportada, quanto maior a massa, maior a quantidade de energia necessária ao transporte. Então, reconhecer a condição de carga através dos dados já existentes no caminhão, sem a adição de sensores específicos, trata-se de uma ideia interessante a tentar ser replicada e, portanto, de interesse a quem deseja utilizar dados para economizar combustível em transporte de carga.

Além dos trabalhos mencionados, outros quinze estudos foram classificados como de interesse convergente, por ordem de citação (Citações - Citescore): 4º (91 – 10,1), 38º (8 – 3,7), 39º (8 – 0), 44º (6 – 0,6), 49º (5 – 0), 72º (2 – 8,2), 99º (1 – 2,2), 109º (1 – 0), 114º (1 – 0), 117º (0 – 11,0), 119º (0 – 1,8), 126º (0 – 0), 132º (0 – 1,1), 146º (0 – 5,0) e 162º (0 – 0).

#### 4. CONCLUSÕES

A utilização dos recursos disponíveis na busca avançada do Scopus se mostrou muito eficiente e relevante nessa seleção de artigos para leitura. A separação em quatro grupos de pesquisa,

aliada à busca pela interseção entre estes, apontou-se relevante e trouxe um número reduzido de respostas, apesar da abrangência das palavras de busca. Isso permitiu reduzir de quase 5 milhões de artigos a um grupo de apenas 178.

Os critérios de ranqueamentos adotados para priorizar a leitura não se revelaram eficazes, pois tanto o artigo com maior número de citações, quanto o artigo publicado no *journal* de maior Citescore, foram classificados como divergentes. A explicação advém da vasta aplicabilidade do *machine learning*, o que explica encontrar trabalhos em *journals* de diversas áreas. Então, o critério de elegibilidade exigiu a análise de cada um dos *abstracts* dos 178 arquivos resultantes da busca avançada a fim de fechar a classificação de artigos convergentes ou divergentes.

Estudos interessantes que buscaram melhorias nos processos de captura, transmissão e armazenamento dos dados, ou a comunicação autônoma entre veículos, ou que visavam utilizar os dados para avaliação da qualidade da pavimentação de estradas, ou para a criação sensores virtuais para algum gás emitido na combustão, entre outros, foram classificados como divergentes. Enquanto os convergentes estavam diretamente correlacionados com o uso da análise de dados para melhor compreensão dos fatores significativos que levam a um maior consumo ou economia de combustível em frotas de caminhões rodoviários.

## REFERÊNCIAS

BRASIL. Ministério de Minas e Energia; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE; AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA - AIE. **Transporte Rodoviário de Cargas - Brasil 2021 - Benchmarking Internacional**. Brasil: Ministério de Minas e Energia, 2021.

HU, S.; SHU, S.; BISHOP, J.; NA, X.; STETTLER, M. Vehicle telematics data for urban freight environmental impact analysis. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 102, n. 103121, 2022.

THOBEN, K.-D.; WIESNER, S. A.; WUEST, T. “Industrie 4.0” and smart manufacturing-a review of research issues and application examples. **International Journal of Automation Technology**, v. 11, n. 1, p. 4-16, 2017.

HOPKINS, J.; HAWKING, P. Big data analytics and IoT in logistics: A case study. **International Journal of Logistics Management**, v. 29, n. 2, p. 575-591, 2018.

MOSTEFAOUI, A.; MERZOUG, M. A.; HAROUN, A.; NASSAR, A.; DESSABLES, F. Big data architecture for connected vehicles: Feedback and application examples from an automotive group. **Future Generation Computer Systems**, v. 134, p. 374-387, 2022.

KO, K.; LEE, T.; JEONG, S. A deep learning method for monitoring vehicle energy consumption with gps data. **Sustainability**, v. 13, n. 20, 2021.

VENUGOPAL, V.; RAJ BOB; P.; NAIR, V. Methodology to recognize vehicle loading condition - an indirect method using telematics and machine learning. **SAE Technical Papers**, January 9th, 2019. ISSN 0148-7191, e-ISSN 2688-3627.

# UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA SOBRE OBTENÇÃO DE DADOS DE FLUXO E ESCOAMENTO EM TUBULAÇÕES

Gabriela Rocha Franco<sup>1</sup> (gabrielarochaf@gmail.com)

João Paulo da Silva Fonseca<sup>1</sup> (jpsfonseca@ufg.br)

<sup>1</sup>Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e da Computação da Universidade Federal de Goiás

**Resumo:** O índice de produtividade de uma linha de produção pode estar relacionado ao bom funcionamento de seus componentes, dentre eles as redes de tubulações industriais. Ao estimar o nível de confiabilidade das redes de tubulação é possível definir sua influência na produtividade geral fabril, bem como promover melhorias na gestão dos abastecimentos realizados pelas tubulações. Em função disso, o objetivo deste trabalho é realizar uma revisão bibliográfica sobre a obtenção de dados de fluxo e escoamento em tubulações, com o intuito de levantar as principais informações com o objetivo de organizar e catalogar os resultados obtidos facilitando novas pesquisas dirigidas à análise de índices e eficiência em tubulações de açúcar visando reduzir falhas por obstrução. Observou-se que os parâmetros de maior recorrência na obtenção de dados de fluxo e escoamento em tubulações são pressão, viscosidade, perfil de velocidade, vazão volumétrica e concentração do fluido.

**Palavras-chave:** tubulações; escoamento; fluxo; dados.

## 1. INTRODUÇÃO

A indústria 4.0 tem sido substancialmente utilizada para otimizar as atividades operacionais. A internet das coisas (IoT) e as tecnologias inspiradas neste conceito podem ser utilizadas para obter uma infraestrutura para registrar, transmitir e processar grandes volumes de dados gerados a partir de diferentes tipos de fontes, sensores e dispositivos, possibilitando o monitoramento de processos, permitindo a predição de falhas e facilitando a tomada de decisão (ALARCÓN-PAREDES, 2019). Desde a sua criação, a IoT vem crescendo exponencialmente, trazendo um amplo espectro de aplicações possíveis, desde a indústria de energia, conforme apontado por Lee (2015) e Li *et al.* (2018), tomada de decisão de negócios apresentados por Garcia-de-Prado (2017) e Lai (2019), e as cidades inteligentes dos trabalhos de Plageras *et al.* (2018), Rathore *et al.* (2018) e Samadianfard (2014), bem como monitoramento da qualidade do ar estudado por Benammar (2018), Dhingra *et al.* (2019) e Marichal *et al.* (2018), entre outros. Segundo levantamento da Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI), a estimativa anual de redução de custos industriais no Brasil, a partir da migração da indústria para o conceito 4.0, será de, no mínimo, R\$ 73 bilhões/ano (R\$ 37 bilhões/ano categorizados como ganho de eficiência, R\$ 31 bilhões/ano na redução de custos de manutenção de máquina e R\$ 7 bilhões/ano por economia de energia) (ROTTA, 2017).

O índice de produtividade de uma linha de produção pode estar relacionado ao bom funcionamento de seus componentes, dentre eles as redes de tubulações industriais. Ao estimar o nível de confiabilidade das redes de tubulação é possível definir sua influência na produtividade geral fabril, bem como promover melhorias na gestão dos abastecimentos realizados pelas tubu-



lações. Kutylowska (2017) aponta pesquisas e estudos realizados no exterior sobre a análise de falhas, segurança e confiabilidade de sistema de abastecimento de água que pode ser tratado como parte da infraestrutura crítica, corroborados por Hotloś (2007) (ZIMOCH; LOBOS, 2012).

Tubulações industriais podem ser utilizadas em uma indústria de alimentos para transportar insumos, como açúcar e farinha, e esses processos também podem influenciar na produtividade geral fabril. Senhoreli *et al.* (2018) enfatiza a importância para indústrias avançarem de acordo com os pilares da Indústria 4.0 como oportunidade de melhorar processos, otimizar os recursos e inovar.

Técnicas de monitoramento e manutenção preditiva podem determinar as condições de equipamento e componentes mecânicos para avaliar quando uma manutenção deve ser realizada, permitindo minimizar o tempo de inatividade inesperado em um sistema produtivo, promovendo redução de custos de manutenção, prolongamento do ciclo de vida de equipamentos e componentes, etc, conforme apontado por Chuang *et al.* (2019) e Chaves Junior (2021) em seus trabalhos.

Neste contexto, este artigo tem como objetivo apresentar uma revisão sistemática da literatura sobre a obtenção de dados de fluxo e escoamento em tubulações, com o intuito de levantar as principais informações, organizar e catalogar os resultados obtidos, facilitando novas pesquisas dirigidas à análise de índices e eficiência em tubulações com vistas à redução de falhas por obstrução. A natureza da aplicação proposta neste trabalho direciona o estudo para a construção de uma plataforma de testes de tubulação de insumo industrial (açúcar) para monitoramento via instrumentação e análise de dados, possibilitando tomadas de decisão para a manutenção preditiva do sistema.

## 2. METODOLOGIA

A elaboração da revisão sistemática da literatura foi desenvolvida com base na ferramenta PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses). Primeiramente foi definido o tema a ser abordado, o qual é referente à análise de fluxo e escoamento em tubulações, para levantamento de índices e eficiência, visando reduzir falhas por obstrução.

A partir da especificação do tema, foram definidas as palavras-chaves, as quais foram utilizadas na busca sistemática dos estudos revisados. Determinou-se que as palavras-chave utilizadas seriam: “data” “flow” e “pipeline”. Na sequência, foram escolhidas as principais fontes de pesquisa, sendo elas o Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), com acesso aos artigos através da Comunidade Acadêmica Federada (CAFe) disponibilizado aos discentes pela Universidade Federal de Goiás, e o banco de dados de resumos e citações organizado por especialistas SCOPUS.

A coleta e seleção de todos os artigos ocorreu com os filtros de artigos de pesquisa publicados nos últimos 6 anos (2016-2022). Nesta etapa, dentre os 58797 artigos disponíveis, foram analisados os *Percentile Score* dos 50 primeiros artigos da lista de mais relevantes do SCOPUS, e dentre eles foram selecionados os 13 artigos científicos mais relevantes cujas fontes possuem o *Percentile Score* maior que 93% na base SCOPUS. Na sequência, foram analisadas informações com relação aos conceitos abordados, objetivos dos trabalhos, os resultados alcançados, tendo estes sido compilados em análises apresentadas no próximo tópico.

Os artigos selecionados, bem como o *Percentile Score* e ano de publicação são apresentados na Tab. 1.

Tabela 1 - Artigos selecionados em ordem de SCOPUS *Percentile Score*

Nº	Título	Ano	Source Title	Percentile
1	Experimental study on local scour around a forced vibrating pipeline in unidirectional flows	2022	Coastal Engineering	99.0% Ocean Engineering
2	Effects of pipeline geometry, sample volume, and flow rate on pb monitoring outcomes in copper pipe drinking water supply systems	2022	Water Research	99.0% Civil and Structural Engineering
3	Frequency response function method for dynamic gas flow modeling and its application in pipeline system leakage diagnosis	2022	Applied Energy	99.0% Building and Construction
4	Flow regime identification for air valves failure evaluation in water pipelines using pressure data	2019	Water Research	99.0% Civil and Structural Engineering
5	Debris-flow-induced damage assessment for a submarine pipeline network in regionalscale natural terrain	2022	Engineering Geology	98.0% Geology
6	Network flow based approaches for the pipelines routing problem in naval design	2022	Omega	96.0% Management Science and Operations Research
7	Detection of faults in subsea pipelines by flow monitoring with regression supervised machine learning	2022	Process Safety and Environmental Protection	96.0% Safety, Risk, Reliability and Quality
8	Efficient pipelined flow classification for intelligent data processing in IoT	2022	Digital Communications and Networks	96.0% Computer Networks and Communications
9	Heavy oil-water dispersed flows in horizontal pipelines using bio-additives with energy analysis: Experimental and numerical investigations	2022	Journal of Petroleum Science and Engineering	95.0% Geotechnical Engineering and Engineering Geology
10	Rheological characteristics of concentrated Indian coal ash slurries and flow through pipelines	2022	Construction and Building Materials	95.0% Civil and Structural Engineering
11	Modeling transient cavitating flow in large drop crude oil pipelines	2022	Journal of Petroleum Science and Engineering	95.0% Geotechnical Engineering and Engineering Geology
12	Two-phase slug flow Lagrangian data analysis: Tracking unit-cell behavior across the pipeline with experimental data	2022	Experimental Thermal and Fluid Science	94.0% Aerospace Engineering
13	Experimental and Data-driven approach of investigating the effect of parameters on the fluid flow characteristic of nanosilica enhanced two phase flow in pipeline	2021	Alexandria Engineering Journal	93.0% General Engineering

Fonte: o autor.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

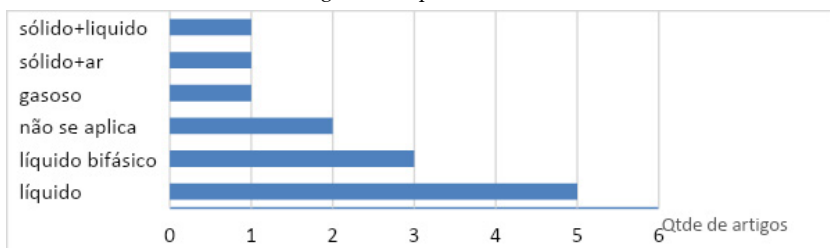
Para a análise e discussão aqui apresentadas, os artigos foram categorizados de acordo com o tipo de fluido e parâmetros abordados nos estudos, conforme apresentado nas Figs. 1 e 2. Os artigos também foram categorizados de acordo com a forma de aquisição de dados para a obtenção dos resultados, dividindo-os entre os que utilizaram instrumentação para aquisição de dados em um modelo experimental e aqueles optaram pela utilização de simulações numéricas para uma modelagem computacional, conforme Fig. 3.

Figura 1 – Recorrência dos parâmetros abordados



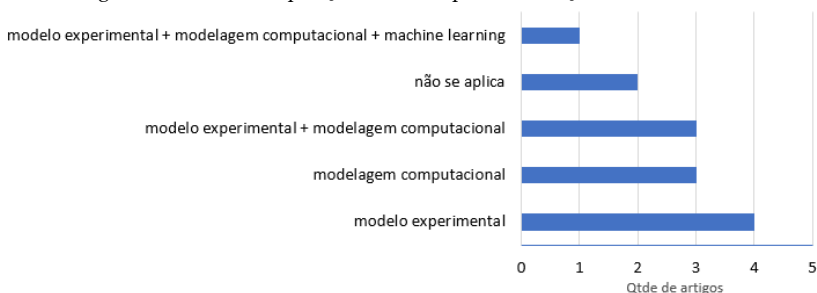
Fonte: o autor.

Figura 2 – Tipo de fluidos



Fonte: o autor.

Figura 3 – Forma de aquisição de dados para a obtenção dos resultados



Fonte: o autor.

Observa-se que os parâmetros citados com maior frequência são pressão, viscosidade, perfil de velocidade, vazão volumétrica e concentração do fluido. A maior parte dos artigos encontrados apresentam estudos sobre tubulações com líquidos, totalizando 9 artigos contendo líquido como fluido.

A obtenção de dados com base em um modelo experimental apareceu em 8 artigos analisados, sendo que metade deles também contaram com a modelagem computacional para análise e comparação dos dados para uma melhor obtenção de resultados.

Ao final, dois artigos foram retirados da análise por divergirem ao tema de estudo (classificados como “não se aplica” nas Fig. 1, 2 e 3).

## 4. CONCLUSÕES

A partir dos artigos analisados, conclui-se que os parâmetros de maior recorrência na obtenção de dados de fluxo e escoamento em tubulações são: pressão, viscosidade, perfil de velocidade, vazão volumétrica e concentração do fluido. O método mais utilizado para aquisição dos dados foi a modelagem experimental, todos os artigos citam também a importância da combinação da análise de dados por meio computacional e empírico, evidenciado na referência em que houve utilização de *machine learning* para determinação de falhas e monitoramento mais eficiente da tubulação.

Como trabalhos futuros, sugere-se ampliar o número de artigos pesquisados que abordem o uso de sólidos e gases transportados nas tubulações, bem como a procura por artigos que descrevem e/ou comparam os instrumentos de medição utilizados para a aferição dos dados.

## REFERÊNCIAS

- ALARCÓN-PAREDES, A. *et al.* An IoT-Based Non-Invasive Glucose Level Monitoring System Using Raspberry Pi. **Applied Science**, v. 9, n. 15, 2019. DOI: 10.3390/app9153046.
- BENAMMAR, M. *et al.* A modular IoT platform for real-time indoor air quality monitoring. **Sensors**, v. 18, n. 2, fev. 2018.
- BLANCO, V. *et al.* Network flow based approaches for the pipelines routing problem in naval design. **Omega**, v. 111, sept. 2022.
- CHANG, L. Effects of pipeline geometry, sample volume, and flow rate on pb monitoring outcomes in copper pipe drinking water supply systems. **Water Research**, v. 222, 15 ago. 2022.
- CHAVES JUNIOR, W. S. C. Engenharia de Materiais no âmbito da Indústria 4.0. **RCMOS - Revista Científica Multidisciplinar O Saber**, São Paulo, v. 06, p. 01-9, jun. 2021. ISSN 2675-9128. DOI 10.51473.

- CHEN, Y. *et al.* Debris-flow-induced damage assessment for a submarine pipeline network in regionalscale natural terrain. **Engineering Geology**, v. 311, 20 dec. 2022.
- CHIARELLO, C. *et al.* Two-phase slug flow Lagrangian data analysis: Tracking unit-cell behavior across the pipeline with experimental data. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 137, 1 sept. 2022.
- CHUANG, S. Y. *et al.* Predictive Maintenance with Sensor Data Analytics on a Raspberry Pi-Based Experimental Platform. **Sensors**, v. 19, n. 18, 2019. DOI 10.3390/s19183884.
- DHINGRA, S. *et al.* Internet of things mobile-air pollution monitoring system (IoT-Mobair). **IEEE Int. Things J**, v. 6, n. 3, 2019.
- EASTVEDT, D.; NATERER, G.; DUAN, X. Detection of faults in subsea pipelines by flow monitoring with regression supervised machine learning. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 161, may 2022.
- GARCIA-DE-PRADO, A. *et al.* COLlaborativE ConText-aware service-oriented architecture for intelligent decision-making in the Internet of Things. **Expert Syst**, v. 85, 1 nov. 2017.
- GUDALA, M. *et al.* Heavy oil-water dispersed flows in horizontal pipelines using bio-additives with energy analysis: Experimental and numerical investigations. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 211, apr. 2022.
- HOTŁOŚ, H. **Quantitative assessment of the effect of some factors on the parameters and operating costs of water-pipe network**. Wrocław University of Technology Publishing House: Wrocław, Poland, 2007.
- KUTYŁOWSKA, M. Prediction of Availability Indicator of Water Pipes Using Artificial Intelligence. *In: E3S WEB OF CONFERENCES*, 2017, Poland. **Proceedings [...]**, v. 17, Poland, 2017.
- LAI, X. *et al.* IoT Implementation of kalman filter to improve accuracy of air quality monitoring and prediction. **Applied Science**, v. 9, n. 9, 2019.
- LEE, I.; LEE, K. The Internet of Things (IoT): Applications, investments, and challenges for enterprises. **Business Horizons**, v. 58, n. 4, p. 431-440, jul./aug. 2015.
- LI, C. *et al.* Modeling transient cavitating flow in large drop crude oil pipelines. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 220, part A, jan. 2023. Available *online* 13 nov. 2022.

LI, S. *et al.* Energy-efficient resource allocation for industrial cyber-physical IoT systems in 5G era. **IEEE Trans. Ind. Inform.**, v. 14, n. 6, 2018.

LI, X. *et al.* Frequency response function method for dynamic gas flow modeling and its application in pipeline system leakage diagnosis. **Applied Energy**, v. 324, 15 oct. 2022.

LIU H. *et al.* Flow regime identification for air valves failure evaluation in water pipelines using pressure data. **Water Research**, v. 165, 15 nov. 2019.

MAKAR, J. M. A preliminary analysis of failures in grey cast iron water pipes. **Engineering Failure Analysis**, Ontario, Canada, v. 7, n. 1, feb. 2000.

MARICHAL, G. N. *et al.* Feature extraction from indirect monitoring in marine oil separation systems. **Sensors**, v. 18, n. 9, 2018.

MOUSAVI, S. N. *et al.* Efficient pipelined flow classification for intelligent data processing in IoT. **Digital Communications and Networks**, v. 8, n. 4, aug. 2022.

PLAGERAS, A. P. *et al.* Efficient IoT-based sensor BIG Data collection—Processing and analysis in smart buildings. **Futur. Gener. Comput. Syst.**, v. 82, may 2018.

PRASAD, V.; MEHROTRA, S. P.; THAREJA, P. Rheological characteristics of concentrated Indian coal ash slurries and flow through pipelines. **Construction and Building Materials**, v. 361, 26 dec. 2022.

RATHORE, M. M. *et al.* Exploiting IoT and big data analytics: Defining Smart Digital City using real-time urban data. **Sustain. Cities Soc.**, v. 40, jul. 2018.

SAMADIANFARD, S. *et al.* Determining flow friction factor in irrigation pipes using data mining and artificial intelligence approaches. **Applied Artificial Intelligence**, v. 28, n. 8, 2014. DOI 10.1080/08839514.2014.952923.

ROTTA, F. Indústria 4.0 pode economizar R\$ 73 bilhões ao ano para o Brasil. **Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI)**, 20 dez. 2017. Disponível em: <https://www.abdi.com.br/postagem/industria-4-0-pode-economizar-r-73-bilhoes-ao-ano-para-o-brasil>. Acesso em: 10 dez. 2022.

SENHORELI, A.; OLIVEIRA, C. A. S.; YAMADA, V. Y. Indústria 4.0: uma análise da indústria brasileira perante o mundo. *In*: CONGRES-



SO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 8., 2018, Ponta Grossa. **Anais** [...]. Ponta Grossa, PR, 2018.

SHNAIN, Y. Z. *et al.* Experimental and Data-driven approach of investigating the effect of parameters on the fluid flow characteristic of nanosilica enhanced two phase flow in pipeline. **Alexandria Engineering Journal**, v. 61, n. 2, feb. 2022. Available *online* 26 jun. 2021.

ZHANG, Z. *et al.* Experimental study on local scour around a forced vibrating pipeline in unidirectional flows. **Coastal Engineering**, v. 176, sept. 2022.

ZIMPOCH, I.; LOBOS, E. Comprehensive interpretation of safety of wide water supply systems. **Environment Protection Engineering**, v. 38, n. 3, 2012. DOI 10.5277/EPE120310.

# PROCESSO DE MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO (MADA) EM AÇO CARBONO COM E SEM ADIÇÃO DE ARAME FRIO

Gustavo de Castro Lopes<sup>1</sup> (castro.gustavo@discente.ufg.br)

Demostenes Ferreira Filho<sup>1</sup> (demostenesferreira@ufg.br)

Valtair Antônio Ferraresi<sup>2</sup> (valtair@ufu.br)

Daniel Souza<sup>1</sup> (daniel.souza@ufg.br)

<sup>1</sup>Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação/UFU

<sup>2</sup>Núcleo de Fabricação, Centro de Ciências Exatas e Tecnologia/UFU

**Resumo:** A Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA) consiste na fabricação de pré-formas metálicas a partir da deposição de multicamadas de cordões de solda sobre um substrato, ou seja, a partir de um modelo tridimensional, divide-se o objeto em camadas definindo as trajetórias na qual será feita a adição de metal, com a utilização de um manipulador robótico. O objetivo deste trabalho é estudar a influência da adição de arame frio no processo MADA, comparando com a deposição feita com arame único, observando o tempo de resfriamento para diferentes temperaturas de interpasso. Para fabricação das amostras, realizou-se a deposição das camadas sobrepostas em linha reta com auxílio do robô Motoman HP20. Posteriormente, analisaram-se os gráficos de resfriamento ao longo do tempo e observou-se uma variação no tempo de resfriamento nas deposições com aplicação do arame frio quando comparadas às deposições com arame único.

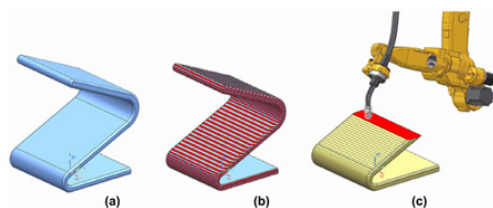
**Palavras-chave:** Manufatura Aditiva por Deposição a Arco; GMAW; arames múltiplos; arame frio; resfriamento.

## 1. INTRODUÇÃO

A manufatura aditiva por deposição a arco (MADA) é um processo no qual a deposição de metal em camadas é feita pelo processo de fusão de um metal de adição na forma de arame. Conforme Figura 1(a), a partir de um modelo tridimensional, divide-se o objeto em camadas (Fig. 1(b)), definindo as trajetórias na qual será feita a adição de metal, com a utilização, por exemplo, de um robô (Fig. 1(c)) (ALBERTI *et al.*, 2016).

Comparado com outros métodos de manufatura aditiva, como por exemplo processos feitos 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.*, 2020).

Figura 1 - Esquema da MADA; (a) modelo CAD 3D; (b) divisão do modelo em camadas; (c) deposição das camadas robotizadas



Fonte: ALBERTI *et al.* (2016).

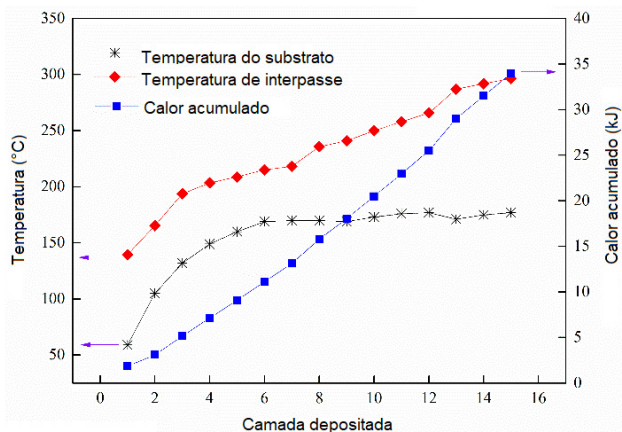
Por possuir uma alta taxa de deposição e uma grande quantidade de energia envolvida no processo, o acúmulo de calor, devido a uma dissipação insuficiente, é um fator crítico que afeta a estabilidade do processo MADA com relação à precisão geométrica, defeitos de deposição e propriedades do material (WU

*et al.*, 2017). Conforme Yang *et al.* (2016), em peças de trabalho com paredes finas, à medida em que a altura da parede se eleva o acúmulo de calor se torna um fator ainda mais influente.

De acordo com Wu *et al.* (2017), utilizando um pirômetro infravermelho, mediu-se a temperatura de interpasse na manufatura aditiva de uma liga de Ti6Al4V, enquanto a temperatura de substrato foi monitorada por termopares e a estabilidade do arco e transferência de metal eram monitorados por uma câmera de alta velocidade. Os resultados mostraram que devido à dissipação térmica ao longo da parede, existe uma diferença significativa na variação de temperatura entre o substrato e a camada depositada. 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 Fig. 2. Notou-se que o acúmulo de calor aumentou conforme aumentou-se também o número de camadas.

Hackenhaar *et al.* (2020) realizou a fabricação de amostras utilizando a liga ER70S-6 como material de deposição através do processo MADA, em seguida comparou amostras que foram resfriadas por convecção livre e por choque de jato de ar. Os resultados indicaram que o resfriamento por jato de ar tem influência significativa no processo, limitando o aumento progressivo da temperatura de interpasse em relação ao resfriamento por convecção livre. O método de resfriamento com jato de ar reduziu as temperaturas do substrato. Ao utilizar esse tipo de resfriamento, o aumento do tempo de espera de 30 segundos para 120 segundos não resultou em diminuição da temperatura do substrato. Entretanto, os testes realizados com tempo ocioso de 10 segundos comprovaram que o jato de ar não evitou o aumento da temperatura do substrato, reduzindo apenas sua magnitude. Isso sugere que, para um determinado processo, tamanho da peça e condição do jato, há um limite para a eficácia do resfriamento de ar.

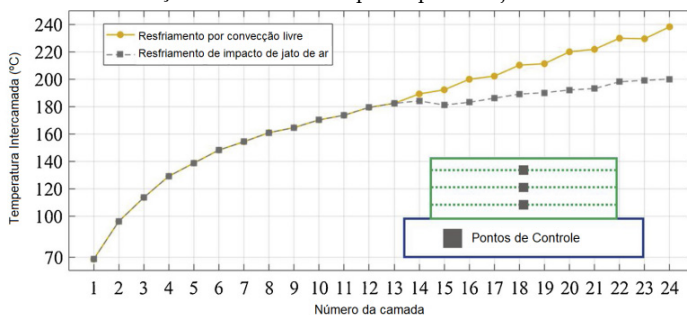
Figura 2 - Acúmulo de calor e temperaturas ao longo da deposição da liga Ti6Al4V feita por MADA



Fonte: Adaptado de WU *et al.* (2017).

A Fig. 3 apresenta os resultados da comparação das temperaturas simuladas entre camadas para convecção livre e condições de resfriamento por impacto de jato de ar. Em ambas as curvas, a temperatura de intercamada aumenta ao longo do processo de deposição. No entanto, a curva relacionada ao jato de ar mostra uma mudança significativa na inclinação da curva após a ativação do resfriamento a ar.

Figura 3 - Comparação das temperaturas simuladas entre camadas para convecção livre e condições de resfriamento por impacto de jato de ar



Fonte: Adaptado de HACKENHAAR *et al.* (2020).

## 2. METODOLOGIA

Para a execução dos experimentos deste trabalho utilizou-se da estrutura do Laboratório de Materiais e Processos de Fabricação (LAMAF) da Universidade Federal de Goiás (UFG). Para estudar a influência da adição de arame frio no processo MADA, serão avaliados o tempo de resfriamento para diferentes temperaturas de interpasse e a geometria da parede depositada.

### 2.1. Configurações das deposições

Conforme Tab. 1, estabeleceram-se diferentes configurações dos parâmetros para realizar as deposições, variando a temperatura de interpasse utilizando 100°C, 150°C e de forma direta sem intervalo para resfriamento, além de variar a alimentação alternando entre arame único e arames múltiplos, com a presença de alimentação de arame frio.

Tabela 1- Configurações para as deposições

Configuração	Temperatura de Interpasse [°C]	Alimentação com Arame Frio
1	100	Não
2	150	Não
3	Direto	Não
4	100	Sim
5	150	Sim
6	Direto	Sim

Fonte: o autor.

### 2.2. Montagem e parâmetros do experimento

Os arames utilizados para o processo GMAW foram ambos o AWS ER70S-6, sendo o arame frio com 1,0 mm de diâmetro e velocidade de alimentação de 1,5 m/min e o arame energizado com 1,6 mm com velocidade de alimentação de 3,0 m/min. Utilizou-se como metal de base o aço ASTM A36. O gás de proteção foi a mistura de Argônio com 25% de Gás Carbônico (Ar+25% CO<sub>2</sub>) com uma vazão de 25 l/min, com pré gás de 0,2 s e um pós gás de 3,0 s.

Para execução das deposições se utilizou uma fonte eletrônica e multiprocesso IMC DIGIPLUS A7 450 com aparato de soldagem GMAW associada a um robô *Yaskawa Motoman HP20*. A Distância Bico-de-Contato-Peça (DBCP) utilizada foi de 12 mm, utilizando o modo de operação GMAW convencional com transferência por curto-circuito, trabalhando com uma tensão de 18 V.

O resfriamento dos cordões foi monitorado pelo sistema de medição de temperatura que está ligado a uma placa Arduino e um computador, com um sensor MLX90614ESF-DCI, que está no interior da peça fabricada por impressão 3D e é protegido por um sistema com portinhola que se abre através de um servo motor no momento da leitura da temperatura. Embora o sensor possua um limite de medida de temperatura inferior às temperaturas que o cordão depositado apresentava, é possível verificar o tempo de resfriamento até a temperatura de interpasse desejada. Desta forma as curvas de resfriamento terão temperatura máxima de aproximadamente 285°C, devido a essa limitação, porém será possível verificar o tempo de resfriamento até a temperatura de 100°C ou 150°C.

### 2.3 Execução das deposições

Conforme as configurações da Tab. 1, as primeiras deposições (configurações 1, 2 e 3) foram feitas sem alimentação de arame frio. Em todas as configurações, os cordões foram feitos em linha reta, realizando movimentos de ida e retorno no eixo Y do robô, acrescentando um incremento em altura de 1,85 mm para o eixo Z. Nas deposições cuja temperatura de interpasse foi 100°C e 150°C, o resfriamento foi observado através do sistema de medição de temperatura.

Para cada tipo de configuração, foram feitas inicialmente 3 paredes com comprimento de 180 mm, e posteriormente mais outras 6 com comprimento de 130 mm, seguindo as mesmas configurações.

Em cada camada depositada o robô se dirigia a um ponto de medição, no qual o sensor se posicionava na extremidade do cordão depositado, realizando assim a medição de temperatura. Através de um painel ligado ao sistema de temperatura do Arduino era possível visualizar as medidas de temperatura lidas pelo sensor. Quando a medida se aproximava da temperatura de interpasse, começava-se a soar um alerta sonoro a cada segundo indicando que a soldagem estava próxima a ser retomada. Atingida a temperatura de interpasse, o robô direcionava-se para posição a qual havia pausado a deposição, e assim, retomava para realizar a camada seguinte.

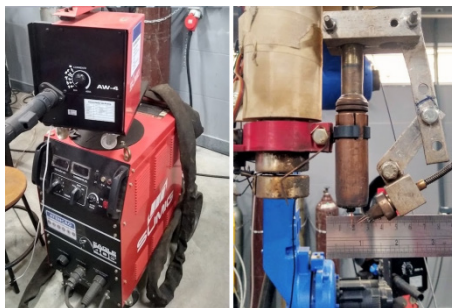
Nas configurações 4, 5 e 6 existe a presença de alimentação de arame frio, ou seja, as deposições foram feitas com arames múltiplos. Conforme a Fig. 4a, utilizou-se uma fonte SUMIG para o arame frio. Acoplou-se o sistema de arame frio ao robô utilizando um suporte de alumínio. Posteriormente, realizou-se o posicionamento da saída de arame frio, para que ficasse alinhado ao arame energizado de forma que a alimentação ocorresse diretamente na poça de fusão.

Com relação ao suporte do arame frio, utilizou-se uma distância de 10 mm do bico do arame frio até a ponta do arame energizado, conforme Fig. 4b, gerando estabilidade e alinhamento, sendo possível a fusão do arame frio durante o processo de soldagem.

A deposição dessas três configurações com alimentação de arame frio (4, 5 e 6) ocorreu de forma semelhante às três primeiras citadas anteriormente (1, 2 e 3), com trajetória de ida e retorno, porém com uma alteração que fazia o robô realizar um giro de  $+180^\circ$  após a primeira camada e retornar  $-180^\circ$  após a segunda camada, fazendo com que a alimentação de arame frio ficasse sempre à frente da tocha de arame energizado, enquanto o sistema de medição de temperatura ficasse posicionado do lado oposto.



Figura 4 - a) Fonte SUMIG para alimentação de arame frio e b) Suporte final do arame frio com distância de 10 mm entre os bicos



a)

b)

Fonte: o autor.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Seguindo as configurações propostas na metodologia, foi possível realizar as deposições variando a temperatura de interpasse e a presença alimentação de arame frio. Algumas deposições são mostradas na Fig. 5.

Figura 5 - Configuração 2: Temperatura de interpasse 150°C a) sem alimentação de arame frio b) com alimentação de arame frio



a)

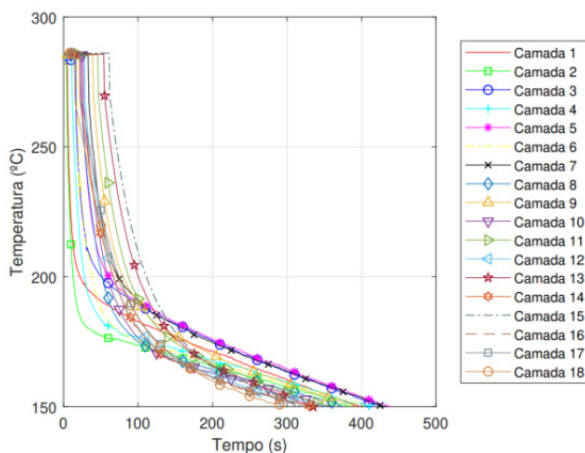
b)

Fonte: o autor.

Com relação ao monitoramento do resfriamento, através da leitura dos dados coletados pelo sensor de temperatura, geraram-se os gráficos das curvas de resfriamento das deposições e uma tabela com os tempos médios de resfriamento.

Conforme pode-se observar nas Fig. 6 e 7, foi possível obter o resfriamento da parede depositada, agrupando-se essas curvas, gerando um gráfico de resfriamento de uma deposição sem arame frio e outro de uma deposição com a presença de arame frio, respectivamente. O gráfico da Fig. 6 corresponde à deposição mostrada anteriormente na Fig. 5a e o gráfico da Fig. 7 corresponde à deposição mostrada na Fig. 5b. Observa-se que a presença da alimentação de arame frio influencia no resfriamento do cordão depositado, deslocando a curva de resfriamento e alcançando a temperatura de interpasse desejada em um tempo menor, quando comparada às curvas do gráfico sem alimentação de arame frio.

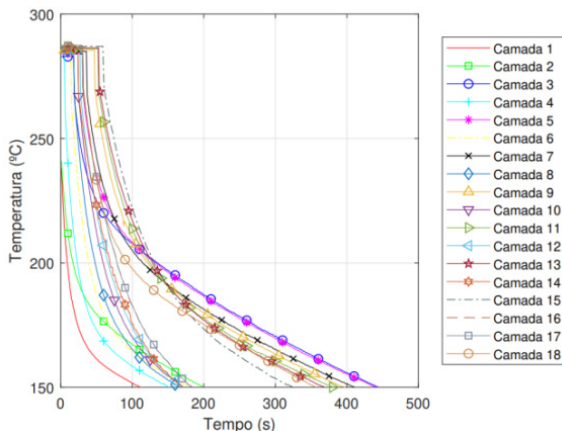
Figura 6 - Configuração 2 - Resfriamento da Parede com Temperatura de Interpasse 150°C sem alimentação de arame frio



Fonte: o autor.

Assim, foi possível observar que o tempo médio de resfriamento da deposição da configuração 5 (267,944 segundos) é menor do que o tempo da deposição da configuração 2 (370,167 segundos).

Figura 7 - Configuração 5 - Resfriamento da Parede com Temperatura de Interpasse 150°C com alimentação de arame frio



Fonte: o autor.

## 4. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram apresentados os resultados de algumas deposições realizadas pelo processo MADA. Foi possível realizar todas as deposições propostas, variando a temperatura de interpasse, utilizando tanto arame único quanto múltiplos arames. Observou-se que o tempo médio de resfriamento da deposição com temperatura de interpasse de 150°C é menor quando comparado ao tempo da deposição com temperatura de interpasse de 100°C.

## REFERÊNCIAS

- ALBERTI, E. A.; SILVA, L. J. da.; D'OLIVEIRA, A. S. C. Additive manufacturing: the role of welding in this window of opportunity. **Welding international**, v. 30, n. 6, p. 413-422, 2016.
- HACKENHAAR, W.; MAZZAFERRO, J. A.; MONTEVECCHI, F.; CAMPATELLI, G. An experimental-numerical study of active cooling

in wire arc additive manufacturing. **Journal of Manufacturing Processes**, Amsterdam, v. 52, p. 58-65, 2020.

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, p. 1-50, 2020.

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**, Amsterdam, v. 227, p. 153-160, 2016.

WU, B.; DING, D.; PAN, Z.; CUIURI, D.; LI, H.; HAN, J.; FEL, Z. Effects of heat accumulation on the arc characteristics and metal transfer behavior in wire arc additive manufacturing of Ti6Al4V. **Journal of Materials Processing Technology**, Amsterdam, v. 250, p. 304-312, 2017.

# SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS DE ESCOAMENTOS SOBRE AEROFÓLIOS E ASAS PARA O DESENVOLVIMENTO DE AERONAVES DE PEQUENO PORTE

Isadora Venancio Bastos<sup>1</sup> (venanciobastos@discente.ufg.br)

Felipe Pamplona Mariano<sup>1</sup> (fpmariano@ufg.br)

<sup>1</sup>Universidade Federal de Goiás (UFG), Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e Computação (EMC), Laboratório de Engenharia Térmica e de Fluidos (LATEF)

**Resumo:** As aeronaves só funcionam com integridade e eficiência quando alcançam a maior razão entre o coeficiente de sustentação e o coeficiente de arrasto, esses coeficientes são números adimensionais relacionados à força exercida por um escoamento de fluido sobre objetos, sendo que o de sustentação é a componente da força vertical e o de arrasto mede a componente da força horizontal. Com a finalidade de obter esses dados, o escoamento sobre o aerofólio NACA 4415 é analisado por meio do software OpenFOAM, para número de Reynolds de 750000, escoamento incompressível e laminar, para fluido newtoniano. O software em questão utiliza as equações de Navier-Stokes e conservação de massa, consequentemente apresenta resultados mais acurados do que simuladores de escoamentos sobre aerofólios que utilizam a teoria de escoamento potencial. Assim, simulações foram feitas para diferentes ângulos de ataque e os resultados adquiridos são comparados com outras bibliografias. Conclui-se que é possível utilizar o programa OpenFOAM para escoamentos sobre aerofólios, destacando o entendimento da metodologia para realizar uma simulação correta.

**Palavras-chave:** escoamento sobre aerofólios; OpenFOAM; coeficientes aerodinâmicos.

## 1. INTRODUÇÃO

A Dinâmica dos Fluidos é uma ciência conhecida por seus cálculos e fórmulas de extrema complexidade. Com o intuito de adquirir os dados desejados, a dinâmica dos fluidos experimental foi desenvolvida, porém, essa encontra outro empecilho, o alto custo de seus equipamentos. Para isso a dinâmica dos fluidos computacional, do inglês, *Computational Fluid Dynamics* (CFD), foi desenvolvida como um modo alternativo de adquirir os dados desejados de escoamentos sobre o objeto de estudo e de forma mais econômica do que a dinâmica dos fluidos experimental (WHITE, 2007).

A chegada do terceiro milênio tem assistido com uma enorme ênfase nas aplicações computacionais em praticamente todos os campos, sendo a mecânica dos fluidos um exemplo primordial. É possível, pelo menos para geometrias e padrões de escoamento moderadamente complexos, modelar em um computador, aproximadamente, as equações do movimento para o escoamento de um fluido. A região do escoamento é subdividida em uma grade fina de elementos e nós, nesses elementos são resolvidas as equações diferenciais parciais que modelam a dinâmica do escoamento. Enquanto simulações simples de escoamento bidimensional têm sido relatadas já há muito tempo e podem ser programadas como exercícios para estudantes, escoamento tridimensionais, envolvendo milhares ou mesmo milhões de pontos de malha, são hoje solucionados com supercomputadores modernos (WHITE, 2007).

Na engenharia aeronáutica, a Dinâmica de Fluidos Computacional moderna proveu meios para calcular com maior acurácia o campo de fluxo ao redor de um avião (ANDERSON JUNIOR, 2015); bem como, a distribuição de pressão tridimensional ao

redor das superfícies da aeronave. Conhecer a distribuição de pressão é essencial tanto para a equipe de engenheiros responsável pelo projeto estrutural quanto para aqueles responsáveis pelo projeto aerodinâmico. No caso da área estrutural, a distribuição de pressão é utilizada para projetar uma fuselagem e as longarinas que sejam capazes de suportarem as cargas aerodinâmicas que atuam na aeronave em virtude da distribuição de pressão; enquanto que, no caso da área de aerodinâmica, a distribuição de pressão é integrada ao redor da superfície do avião com o intuito de obter-se os coeficientes de arrasto e de sustentação da aeronave (ANDERSON JUNIOR, 1995).

Tendo em vista a necessidade do estudo de aerodinâmica para aerofólios na equipe de aerodesign da UFG, Aerodactyl, começou-se o estudo do software *OpenFOAM* para melhorar os conhecimentos técnicos e obter melhores dados do que os obtidos atualmente pela equipe utilizando simuladores e outras ferramentas como o XFLR5 e Matlab, que usam a teoria de escoamento potencial. O objetivo principal deste estudo é comparar os dados alcançados com os dados já adquiridos anteriormente para que se possa avançar nas análises de escoamento sobre aerofólios e desenvolver aeronaves mais eficientes na equipe Aerodactyl.

## 2. METODOLOGIA

Os aerofólios são seções bidimensionais com uma curva pré-determinada de uma asa. Onde o seu intuito é deixar o escoamento colado sobre eles, de forma a minimizar o gradiente adverso de pressão (ANDERSON JUNIOR, 2015). Suas principais características são a linha média, a corda, espessura, arqueamento, bordo de ataque e bordo de fuga apresentadas na Fig. 1.

Os coeficientes analisados para esse estudo são os coeficientes de Sustentação ( $C_l$ ) e de arrasto ( $C_d$ ).

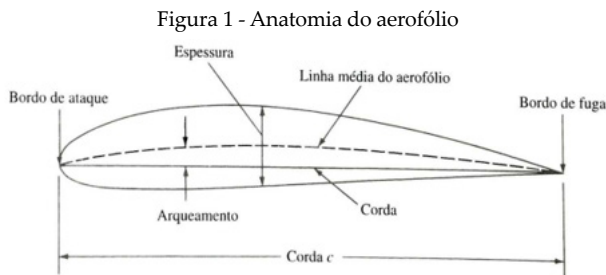
O coeficiente de sustentação é sempre definido como a sustentação aerodinâmica dividida pela pressão aerodinâmica e alguma área de referência (ANDERSON JUNIOR, 2015).

O coeficiente de arrasto é um número adimensional que é usado para quantificar o arrasto ou resistência de um objeto em um meio fluido, permite quantificar a força de resistência ao ar ou outro fluido por parte de uma dada superfície (McCORMICK, 1979)

$$C_l = \frac{2L}{\rho V_0^2 c}, \quad (1)$$

$$C_d = \frac{2D}{\rho V_0^2 c}, \quad (2)$$

onde  $L$  é a sustentação,  $\rho$  é a massa específica,  $c$  é a corda do aerofólio,  $V_0$  é a velocidade do fluido e  $D$  é o arrasto.



Fonte: ANDERSON JUNIOR (2015).

O software *OpenFOAM* se baseia nas equações de Navier-Stokes e de continuidade para fazer simulações de CFD. O que faz dele um simulador com menos restrições do que outros simuladores, que usam, por exemplo, o método dos painéis, como é o caso do XFLR5. As equações representam as equações de continuidade e quantidade de movimento para fluidos newtonianos de escoamento incompressíveis são:



$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial(uv)}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right), \quad (4)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial(uv)}{\partial x} + \frac{\partial v^2}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right), \quad (5)$$

onde  $u$  é a componente do vetor velocidade do escoamento no eixo  $x$ ,  $v$  é a componente vetor velocidade do escoamento no eixo  $y$ ,  $\nu$  é a viscosidade cinemática do fluido e  $\rho$  é a massa específica do fluido,  $p$  é a pressão e  $t$  é o tempo. Apesar das simplificações, é um sistema de equações diferenciais não lineares, o que não permite resolver analiticamente, sendo necessário o uso de CFD.

O aerofólio utilizado no presente estudo é um NACA 4415. Primeiramente, começa-se as simulações para um ângulo de ataque igual a  $10^\circ$ , a velocidade de escoamento livre de  $1,0 \text{ m/s}$  e a viscosidade do fluido fixada em  $1,33 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ , com a corda unitária, obtém-se o número de Reynolds igual à  $750000$ . Utilizou-se o algoritmo *IcoFOAM*, disponível no *OpenFOAM*, que faz seus cálculos para escoamento incompressível e transiente.

O domínio de cálculo é baseado no trabalho de Campos (2021) e os valores utilizados para gerá-lo são apresentados na Tab. 1.

Tabela 1 - Parâmetros para a definição do domínio da malha

Parâmetros	Valor
Distância do inlet (em relação à corda)	20
Distância do outlet (em relação à corda)	40
Ângulo de ataque	Depende da simulação
Profundidade na direção Z	1
Escala da malha	1

Fonte: CAMPOS (2021).

Sobre o domínio de cálculo gerado, são criadas 5 malhas, estruturadas e não uniformes, distintas, vide Tab. 2. Sendo a malha denominada por “malha 1” a mais grosseira e aquela denominada por “malha 5”, a mais refinada.

A análise de refinamento é necessária, para estudar a convergência das simulações de forma a capturar a movimentação da esteira de vórtices à jusante do aerofólio, a qual é fundamental para a compreensão do escoamento sobre o aerofólio (CAMPOS, 2021).

Tabela 2 - Valores adotados para os parâmetros geométricos da malha

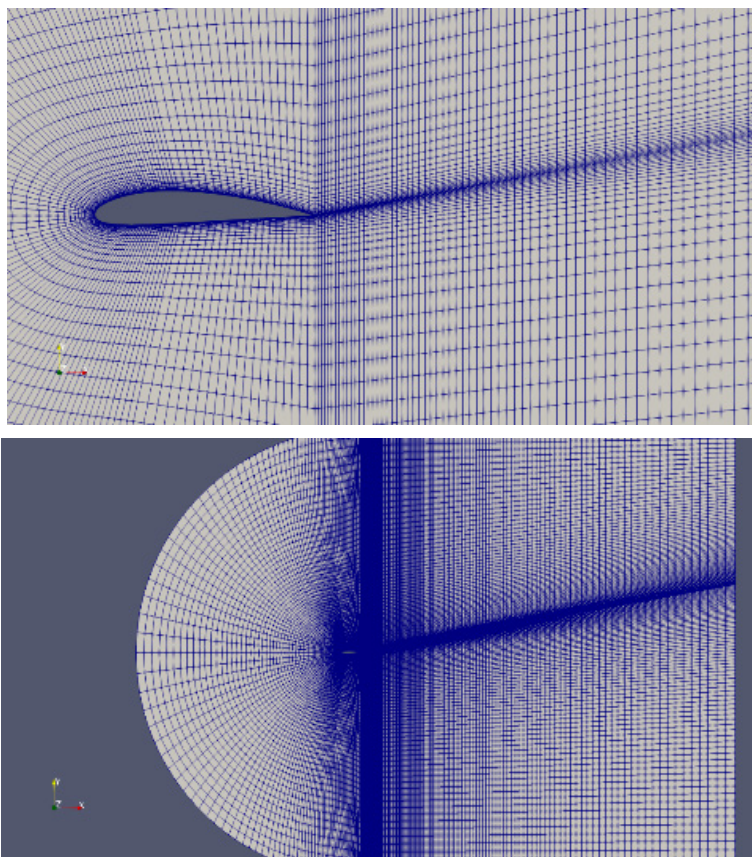
Parâmetros	Valores adotados				
	Malha 1	Malha 2	Malha 3	Malha 4	Malha 5
Tamanho máximo do elemento no bordo de ataque	0,02	0,01	0,005	0,0025	0,00125
Tamanho máximo do elemento no bordo de fuga	0,06	0,03	0,015	0,0075	0,00375
Tamanho máximo do elemento na posição intermediária	0,07	0,035	0,0175	0,00875	0,004375
Espessura da camada limite	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Espessura da primeira camada	0,01	0,005	0,0025	0,00125	0,000625
Taxa de expansão	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Tamanho máximo do elemento no inlet	2	1	0,5	0,25	0,125
Tamanho máximo do elemento no outlet	2	1	0,5	0,25	0,125
Tamanho máximo do elemento no cruzamento do inlet com o outlet	2	1	0,5	0,25	0,125

Fonte: O autor

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como resultado da análise de convergência de malha, escolheu-se a “malha 3”, com os parâmetros apresentados na Tab. 2. Sendo que, apesar da “malha 5” apresentar um refinamento maior, a “malha 3” já é suficiente para obter os resultados desejados, em um menor tempo de simulação computacional, vide Fig. 2.

Figura 2 - Malha utilizada

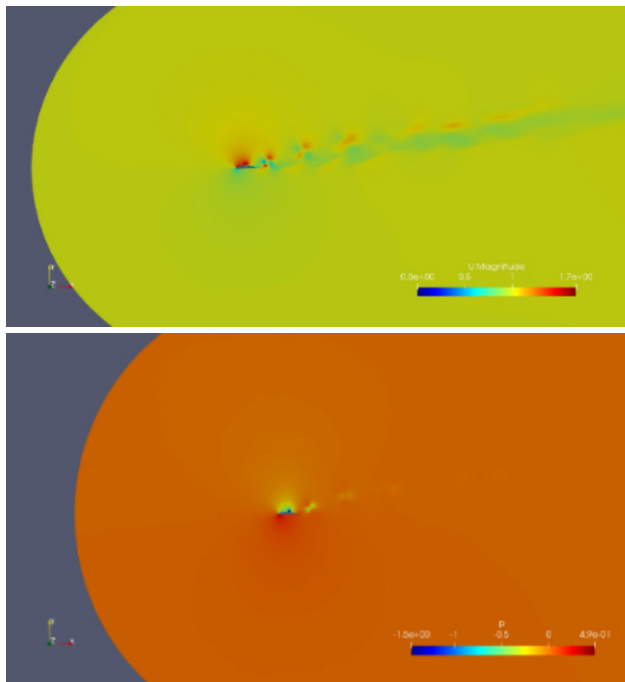


Fonte: o autor.

Através do software, são obtidos os valores de  $C_l$  e  $C_d$  (Eqs. 1 e 2) para diferentes ângulos de ataque ( $0^\circ$ ,  $2^\circ$ ,  $4^\circ$ ,  $6^\circ$ ,  $8^\circ$  e  $10^\circ$ ) e os resultados obtidos são comparados com resultados de outros autores para a validação dos mesmos.

O escoamento é analisado através de duas características principais, o campo de velocidade e o campo de pressão, os quais são apresentados nas Fig. 3 a 5.

Figura 3 - Campos de magnitude da velocidade (superior) e de pressão (inferior) da simulação a  $Re=750000$  e ângulo de ataque  $10^\circ$



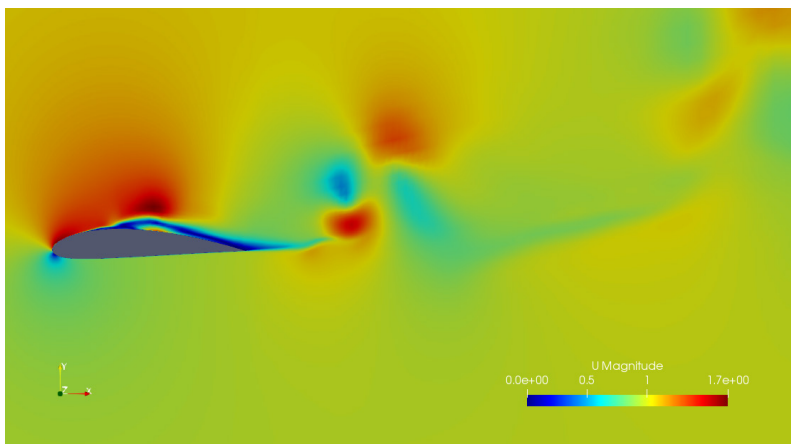
Fonte: o autor.

Na Fig. 3 é possível observar a formação da esteira a jusante do aerofólio, que se encontra em um ângulo de ataque de  $10^\circ$ . Deve-se ficar claro que o escoamento de entrada que se encontra inclinado de  $10^\circ$  em relação ao eixo ortogonal, e a corda do aerofólio (vide Fig. 1), para fins de simplificação de posicionamento, fica alinhada a com a direção horizontal.

Nas Figs. 4 e 5 é possível observar em detalhes as recirculações geradas sobre o extradorso do aerofólio, bem como as recirculações que se desprendem do bordo de ataque. Especificamente, na Fig. 5 observa-se que a pressão é maior abaixo do aerofólio e, em média, menor acima do aerofólio. Logo, essa di-

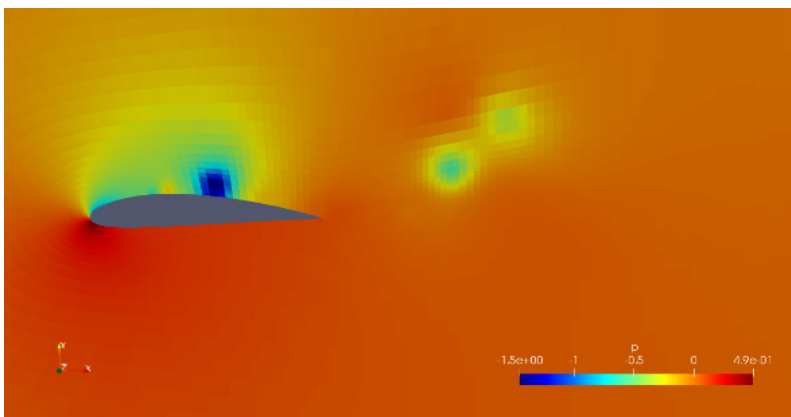
ferença de pressão é responsável pela geração da força de sustentação. Já observando na direção horizontal, há um pico de pressão (vermelho mais escuro) no bordo de ataque do aerofólio, essa pressão maior a montante do aerofólio é a responsável pela geração da força de arrasto.

Figura 4 - Campo de magnitude de velocidade, próximo ao aerofólio



Fonte: o autor.

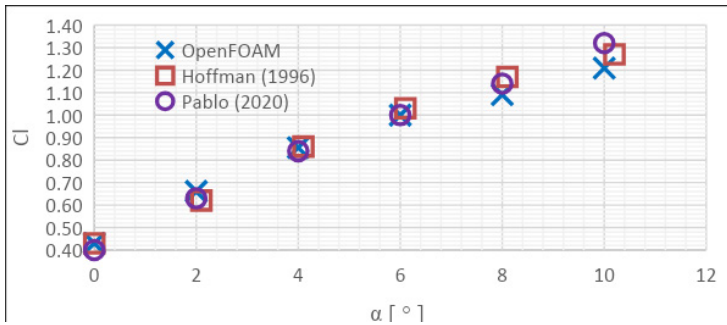
Figura 5 - Campo de pressão próximo ao aerofólio



Fonte: o autor.

Os resultados alcançados nessa simulação foram comparados com os valores  $C_l$  obtidos por Hoffman (1996) que utilizou um túnel de vento e os obtidos por Campos (2021) que também utilizou o *OpenFOAM*. Os resultados são plotados na Fig. 6. Além disso, também é feito o gráfico  $C_l \times C_d$  (Fig. 7) para que se possa analisar todos os parâmetros necessários no estudo de um aerofólio no escoamento especificado.

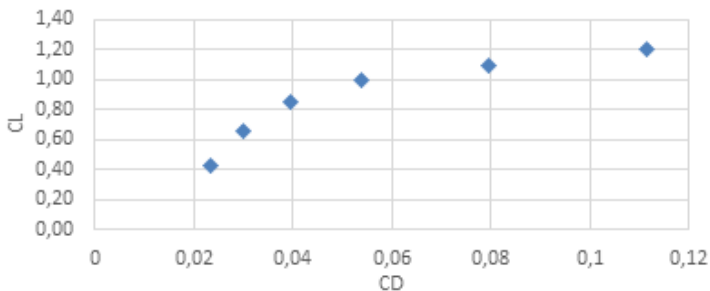
Figura 6 - Coeficiente de sustentação médio por ângulo de ataque,  $C_l \times \alpha$



Fonte: o autor.

Observa-se na Fig. 6 a aproximação entre os resultados do presente artigo e dos demais trabalhos, especialmente, os resultados obtidos experimentalmente de Hoffman (1996). Dessa forma, pode-se inferir que as simulações foram realizadas a contento e o uso do software *OpenFOAM* está validado.

Figura 7 - Polar de Arrasto para o aerofólio



Fonte: o autor.

## 4. CONCLUSÕES

A Mecânica dos Fluidos Computacional oferece uma abordagem diferente - mas nada mais do que isso. Ela complementa bem e sinergicamente as outras duas abordagens de pura teoria e puro experimento, mas não substitui nenhuma dessas abordagens (como as vezes sugerido). Sempre haverá uma necessidade da teoria e do experimento.

De acordo com os resultados obtidos no presente trabalho, pode-se concluir que através do software OpenFOAM é possível obter os coeficientes de sustentação e gerar a curva polar de arrasto de forma satisfatória para os propósitos da equipe Aerodactyl. Além disso, fica evidente a representação do fenômeno físico real com êxito.

Cabe lembrar que as diferenças entre os resultados obtidos neste estudo e os dados apresentados de outras bibliografias podem ser justificados pelo modo de adquirir os mesmos. Em Campos (2021), apesar do uso do mesmo software, foi utilizado o algoritmo *SimpleFOAM*, que utiliza a simplificação para escoamentos permanentes. E em Hoffman (1996) foi utilizado o túnel de vento e os dados são obtidos através de tubos de Pitot, provindos apenas da diferença de pressão, desprezando as forças cisalhantes. Portanto, não é capaz de mensurar os efeitos viscosos no arrasto do objeto de estudo, o que promove mudanças na força de sustentação.

## REFERÊNCIAS

ANDERSON JUNIOR, J. D. **Computational Fluid Dynamics: The Basis with Applications**. Nova Iorque: Editora Mc Graw Hill, 1995. ISBN 0-07-001685-2.

ANDERSON JUNIOR, J. D. **Fundamentos de Engenharia Aeronáutica: Introdução ao voo**. Tradução de Carlos Fernando Rondina Mateus e

Francisco Araújo da Costa. 7. ed. Nova Iorque: Editora Mc Graw Hill, 2015. ISBN 978-85-805- 5480-9.

CAMPOS, P.A.C. **Simulação de Escoamentos Turbulentos em Aerofólios Utilizando o OpenFOAM®**. Orientador: Felipe Pamplona Mariano. 2021. 55 f. Projeto Final de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2021.

FORTUNA, A. O. **Técnicas Computacionais para Dinâmica dos Fluidos: Conceitos Básicos e Aplicações**. 2. ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2012. ISBN 978-85-314-1373-5.

HOFFMAN, M. J. *et al.* **Effects of Grit Roughness and Pitch Oscillations on the NACA 4415 Airfoil**. Airfoil Performance Report – Department of Mechanical and Aerospace Engineering, The Ohio State University, Columbus, 1996.

McCORMICK, B. W. **Aerodynamics, Aeronautics and Flight Mechanics**. New York: Editora Jonh Wiley & Sons, Inc., 1979.

OpenFOAM. **User Guide**. Disponível em <https://www.openfoam.com/documentation/guides/latest/doc/index.html>. Acesso em: 10 out. 2022.

WHITE, F. M. **Fluids Mechanics**. 6. ed. New York: The McGraw-Hill Companies, 2007. 878 p. ISBN 0072938447/9780072938449.



# ESCOAMENTOS SOBRE OBSTÁCULO NO INTERIOR DE DUTO DE SEÇÃO RETANGULAR

Julia Jorge Bastos<sup>1</sup> (julia.jorge@discente.ufg.br)

Andreia Aoyagui Nascimento<sup>1</sup> (aanascimento@ufg.br)

<sup>1</sup>Universidade Federal de Goiás - UFG

**Resumo:** Este trabalho consiste em discutir os efeitos de um escoamento sobre ressalto, nessa ocasião, um bloco entre duas placas que é simulado por meio de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD). A metodologia usada para a simulação do caso é chamada de IMERSPEC, a qual combina os métodos de fronteira imersa e o pseudoespectral de Fourier para simular as condições de contorno. Os resultados obtidos são comparados com experimentos realizados em outro trabalho e usados para a visualização de regiões de recirculação e seus comportamentos ao longo do tempo.

**Palavras-chave:** mecânica dos fluidos; CFD; equações de Navier-Stokes; escoamento laminar; recirculação.

## 1. INTRODUÇÃO

Lima e Silva *et al.* (2003) utilizaram o método da fronteira imersa para estudar o escoamento bidimensional e uniforme sobre um cilindro, de forma que não houvesse escorregamento na interface fluido-cilindro nem constantes de ajuste. Essa metodologia, chamada de “Physical Virtual Model” (PVM), se mostrou apropriada para simulações de escoamentos viscosos, incompressíveis e instáveis e promissora para simular fluxos sobre outras geometrias.

Em relação às estruturas de geometria mais complexas, Silva *et al.* (2007) avaliaram a eficiência do método da fronteira imersa e do PVM e observaram que, sobre os diferentes arranjos de cilindros e outras geometrias simulados, o método foi suficiente para analisar o comportamento do escoamento por essas estruturas e visualizar os rastros gerados pelos corpos no fluxo.

Mais recentemente, Mariano *et al.* (2022) combinaram o método pseudoespectral de Fourier e o método da fronteira imersa para analisar escoamentos sobre geometrias complexas com condições de contorno não periódicas. Tal metodologia foi denominada IMERSPEC e mostrou resultados de acurácia satisfatória para simulações bi e tridimensionais, além de dispensar sistemas lineares para encontrar o campo de pressão, o qual adquiriu ordem de convergência maior que a usual.

No atual trabalho, o método IMERSPEC foi utilizado para simular o escoamento sobre um ressalto quadrado entre duas placas com o intuito de entender a física do problema observando as regiões em que as instabilidades são normalmente formadas em situações reais análogas.

## 2. METODOLOGIA

As formulações usadas para a aplicação do método IMERSPEC são as equações de Navier-Stokes Eq. 1 e da continuidade Eq. 2 no espaço físico, onde  $u$  representa a componente velocidade,  $t$  é a variável tempo,  $p$  é a variável pressão,  $\nu$  é a viscosidade,  $\rho$  é a massa específica e  $f$  é o termo fonte da equação, onde é considerada a interface com o método da fronteira imersa.

$$\frac{\partial u_j}{\partial t} + \frac{\partial(u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \left( \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \right) + \frac{1}{\rho} f_i \quad (1)$$

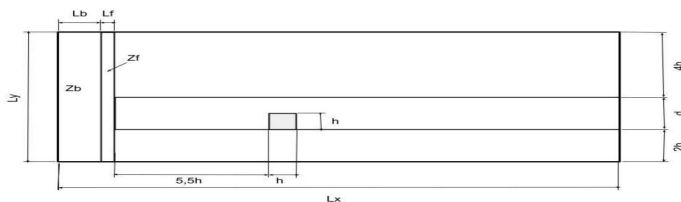
$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (2)$$

As hipóteses utilizadas são escoamento bidimensional, viscoso, completamente desenvolvido, incompressível e sem transferências de calor, as quais são aplicadas no domínio Euleriano e são resolvidas as equações de Navier-Stokes, Eq. 1. Neste domínio foi adicionado um campo de força, o qual tem como objetivo garantir a condição de não escorregamento na interface parede-fluido. Esse domínio é denominado domínio Lagrangiano e é igual à zero sobre a fronteira imersa.

Para a solução das equações por meio da metodologia IMERSPEC realiza-se a transformada de Fourier nas Eq. 1 e Eq. 2. Ao transformar a Eq. 2 é possível obter um plano, denominado  $\pi$  ou plano de divergência nula, onde são projetados todos os termos da Eq. 1, objetivando manter a conservação da massa. Uma vantagem do método pseudoespectral é o desacoplamento do termo de pressão e, portanto, não é necessário utilizar metodologias como passo fracionado para solução do sistema linear, ademais, a substituição da integral de convolução para produtos de variáveis, tais vantagens fazem o IMERSPEC se tornar uma ferramenta rápida e bastante atrativa para solução de escoamentos de fluidos com alta ordem de acurácia.

O sistema modelado é composto por uma zona de forçagem,  $Z_f$ , a qual impulsiona o escoamento na entrada do duto, uma zona de Buffer,  $Z_b$ , a qual amortece o fluxo das instabilidades que saem do lado esquerdo do domínio e são inseridas no lado direito. Também é composto por duas placas paralelas representando o próprio duto e um bloco posicionado na placa inferior. A esquematização e as dimensões do sistema estão representadas na Fig.1 e Tab.1.

Figura 1 - Esquematização do sistema



Fonte: o autor.

Tabela 1 - Tabela de especificações do sistema

$n_x$	Número de divisões do eixo x	640
$n_y$	Número de divisões do eixo y	254
$L_x$	Comprimento adimensional do domínio	$20,0h$
$L_y$	Altura adimensional do domínio	$8,0h$
$h$	Altura adimensional do cubo	1,0
$L_b$	Comprimento adimensional da Zona de Buffer	$1,5h$
$L_f$	Comprimento adimensional da Zona de forçagem	$0,5h$
$d$	Distância adimensional entre as placas	$2,0h$

Fonte: o autor.

Estabeleceu-se também a massa específica igual a  $1,0 \text{ Kg/m}^3$  e o número de Reynolds, Eq. 3, como sendo

$$Re = \frac{U_{\infty} d}{\nu} \quad (3)$$

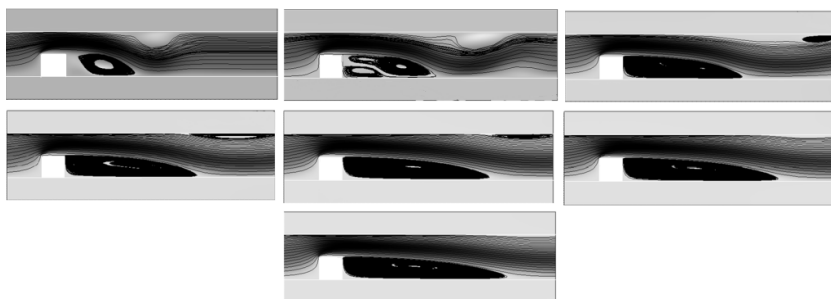
onde  $U_{\infty}$  é a velocidade máxima inserida pela zona de forçagem,  $d$  é a distância entre as placas e  $\nu$  a viscosidade cinemática do fluido. O valor utilizado para  $Re$  é igual a 200. Após determinados os parâmetros descritos, o código é executado até que se atinja o tempo físico de simulação de aproximadamente 5,0 s, o que durou em tempo real 6869 minutos, aproximadamente.

A malha usada para tal simulação é de  $640 \times 256$  pontos, quantidade suficiente para alcançar, de acordo com Santos (2022), boa compatibilidade com os experimentos realizados nas mesmas condições.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

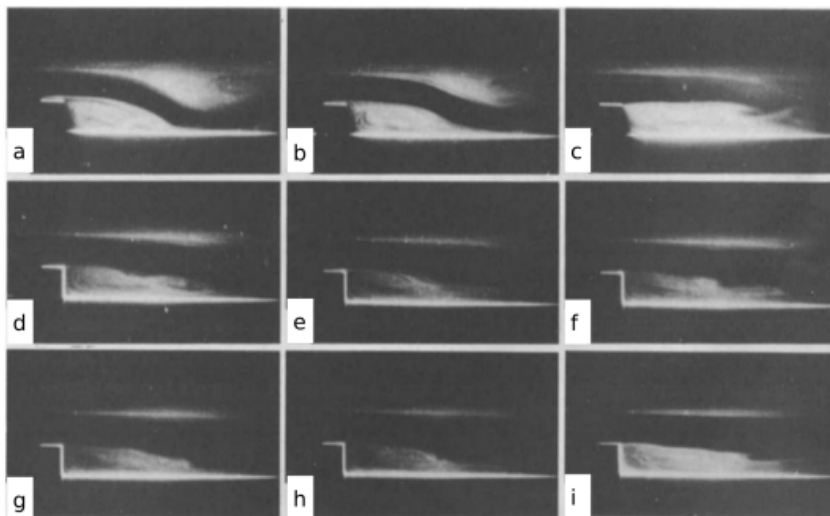
Os dados resultantes da execução do código IMERSPEC para as condições estabelecidas foram plotados e as imagens obtidas estão apresentadas na Fig. 2. A Fig. 3 foi retirada do trabalho de Onur e Baydar (1992) e é usada para comparação.

Figura 2 - Evolução temporal



Fonte: o autor.

Figura 3 - Resultados de Onur e Baydar



Fonte: Imagens retiradas de Onur e Baydar (1992).

Como se pode notar na Fig. 2, as zonas de recirculação são visíveis, e suas variações com relação ao tempo também. Inicialmente, formam-se duas zonas de recirculação sendo, uma logo após o obstáculo, e outra próxima a parede superior. Com o avançar do tempo, a instabilidade superior diminui consideravelmente a espessura e comprimento, enquanto a recirculação após o obstáculo tem seu comprimento elevado.

Essas recirculações aparecem devido a condição de não escorregamento entre a interface fluido-parede, definido inicialmente pelo método de fronteira imersa. Como a velocidade na fronteira é igual a zero, o fluido próximo à fronteira e ao obstáculo tende a desacelerar, o que induz o fluido a recircular em direção a parede inferior, formando assim uma instabilidade que rotaciona no sentido horário. Ao comparar as imagens obtidas na simulação e as imagens produzidas experimentalmente por Onur e

Baydar (1992), nota-se grande similaridade no comportamento no escoamento como um todo, principalmente na posição das instabilidades.

#### 4. CONCLUSÕES

Conclui-se que o método IMERSPEC é válido para simulações computacionais de escoamentos laminares, bidimensionais, viscosos e incompressíveis sobre um obstáculo quadrado, o qual está localizado no interior de um duto. Tal metodologia possibilitou a visualização e análise do escoamento proposto com grande similaridade aos resultados experimentais. Alguns estudos ainda estão sendo feitos para testar a utilidade do método em diferentes distâncias entre paredes e diferentes números de pontos no domínio. A metodologia está mostrando resultados promissores, no que diz respeito a obstáculos apoiados sobre a superfície.

#### 5. AGRADECIMENTOS

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

#### REFERÊNCIAS

LIMA E SILVA, A.L.F.; SILVEIRA-NETO, A.; DAMASCENO, J. J. R. Numerical simulation of two-dimensional flows over a circular cylinder using the immersed boundary method. **Journal of Computational Physics**, n. 189, p. 351-370, 2003.

LIMA E SILVA, A.L.F.; SILVA, A. R.; SILVEIRA-NETO, A. Numerical Simulation of Two-Dimensional Complex Flows Around Bluff Bodies Using the Immersed Boundary Method. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. XXIX. n. 4, p. 379, 2007.

MARIANO, F. P.; MOREIRA, L. Q.; NASCIMENTO, A. A. An improved immersed boundary method by coupling of the multi-direct forcing and Fourier pseudo-spectral methods. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, Brazil, v. 44, n. 388, 2022.

ONUR, H.; BAYDAR, E. Laminar channel flow over a square step. **International Journal of Engineering Science**, v. 30, n. 9, p. 1109-1116, 1992.

SANTOS, J. L. S. **Análise de escoamento sobre corpo rígido e deformável utilizando o método pseudoespectral de Fourier**. 2022. Dissertação (Mestrado em Ciências Mecânicas) – Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2022.



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

Júlio Modesto Beghelli<sup>1</sup> (juliomodesto@discente.ufg.br)

Felipe Pamplona Mariano<sup>1</sup> (fpmariano@ufg.br)

<sup>1</sup>Universidade Federal de Goiás (UFG), Laboratório de Engenharia Térmica e de Fluidos (LATEF)

**Resumo:** Sistemas de ventilação, refrigeração e aquecimento tornaram-se indispensáveis para ambientes ocupados que demandam conforto térmico. O conforto térmico impacta diretamente na produtividade, bem-estar, saúde e no consumo energético, tendo em vista que ao atingir a temperatura ambiente ideal, o ar-condicionado reduz o tempo de operação do compressor. A fim de analisar a movimentação do ar e propor possíveis otimizações, no presente trabalho utiliza-se a Dinâmica dos Fluidos Computacional, que é uma importante ferramenta para o estudo de escoamentos de fluidos, pois, com sua utilização, é possível avaliar o comportamento de escoamentos de fluidos sob diferentes condições. No presente trabalho, é realizado um estudo de conforto térmico, usando o software OpenFOAM, com configurações similares a de um artigo de referência. Nesse experimento, uma sala climatizada é representada computacionalmente, nela os parâmetros de entrada variam de forma a investigar a influência da temperatura e a velocidade de insuflamento do ar.

**Palavras-chave:** conforto térmico; HVAC; CFD; OpenFOAM.

## 1. INTRODUÇÃO

A modelagem matemática e numérica de fenômenos físicos, relacionados com 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 representação física de diversos tipos de escoamentos (ÇENGEL; CIMBALA, 2011; WHITE; CORFIELD, 2006).

Dentre essa diversidade de aplicações, na execução do presente projeto, 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. O correto dimensionamento dos sistemas de ventilação e ar-condicionado (VAC) justifica-se do ponto de vista energético, pois garante um ambiente climatizado, tanto para conforto, quanto em ambientes especializados para o correto funcionamento de diversos equipamentos, por exemplo, equipamentos médicos, hospitalares, odontológicos, computadores de alto desempenho, “data centers” etc., e mantém o gasto de energia elétrica em níveis compatíveis com a carga térmica exigida nesses ambientes.

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 CO<sub>2</sub>, vírus e outros contaminantes (BRASIL, 2006).

A princípio, o dimensionamento de sistemas de ar-condicionado é feito por meio do método integral (ÇENGEL; CIMBALA, 2011), no qual se obtém valores médios das cargas térmicas de

determinados ambientes e, por vezes, superdimensiona-se os equipamentos para garantir o funcionamento em situações extremas. Entretanto, posicionando os aparelhos de ar-condicionado, ajustando e direcionando adequadamente o fluxo de ar é possível obter equipamentos mais específicos com consumo otimizado e melhor distribuição e qualidade do ar.

Com o intuito de avaliar a performance de um sistema de refrigeração dentro de um espaço bidimensional, Youssef *et al.* (2018) utilizam da dinâmica dos fluidos computacional por meio de simulações elaboradas no software FLUENT ANSYS. O fluxo de ar frio é estudado variando a temperatura do ar insuflado, a velocidade de insuflamento e a carga térmica da sala. Portanto, o nível de conforto térmico é analisado com base no índice de performance de distribuição de ar (ADPI, *Air Diffusion Performance Index*). O ADPI é um índice numérico para avaliar o sistema de distribuição de ar em um ambiente, sendo definido como o número de pontos que satisfazem o critério em uma zona ocupada, conforme estipulado pela ASHRAE (2013).

Visando a ampliação do conhecimento a respeito de diferentes cenários de ventilação, Cheng e Lin (2015) apresentaram o estudo experimental investigando as características do ar para três tipos diferentes de distribuição de ar que modificam o posicionamento, o insuflamento e a exaustão do ar em uma sala. O primeiro método de distribuição é a ventilação por estratificação, o segundo método é a ventilação de mistura e por fim o método de ventilação por deslocamento.

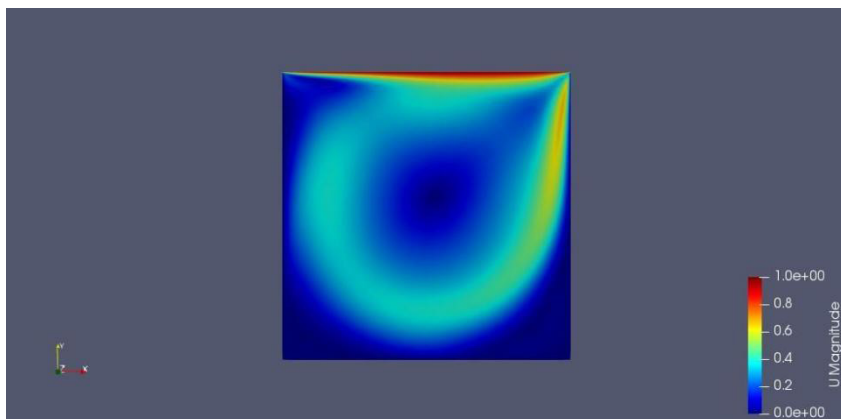
Zhou *et al.* (2001) propõem uma estratégia de controle localizado para otimizar a divisão de uma sala climatizada em diferentes zonas. Zhuang *et al.* (2014) estudam os efeitos da disposição dos móveis na qualidade do ar em um escritório ventilado. Em meios

de saúde, Borro *et al.* (2021) aplicam um modelo baseado na maternidade no Vaticano para investigar o papel do ar-condicionado na difusão do vírus Sars-Covid-2 em ambientes fechados.

A partir do momento em que se obtém a compreensão da movimentação do ar em um determinado ambiente, devem ser sugeridas mudanças estruturais e arquitetônicas para mitigar os problemas de renovação e melhorar a distribuição do ar-condicionado. O presente trabalho almeja validar a aplicação de análises computacionais de escoamentos por meio do software OpenFOAM para avaliar o conforto térmico de ambientes climatizados.

## 2. METODOLOGIA

A primeira etapa é a de verificar a aplicação do OpenFOAM para casos tradicionais da Dinâmica dos Fluidos Computacional. A cavidade com tampa deslizante é um exemplo de aplicação da análise CFD para escoamentos. Desta forma, elabora-se um algoritmo que simula as condições da cavidade com tampa deslizante. Em outras palavras, determina-se que as paredes laterais e inferiores da cavidade não possuem movimentação, enquanto a tampa superior possui movimentação de 1 unidade de velocidade. Sendo assim, esse deslocamento promove a circulação do fluido, conforme apresentado na Fig. 1. Os valores obtidos nessa simulação são comparados com os valores de referência na literatura publicados por Yiannis (2015).

Figura 1 - Escoamento Em Uma Cavidade Com Tampa Deslizante ( $Re=10000$ )

Fonte: o autor.

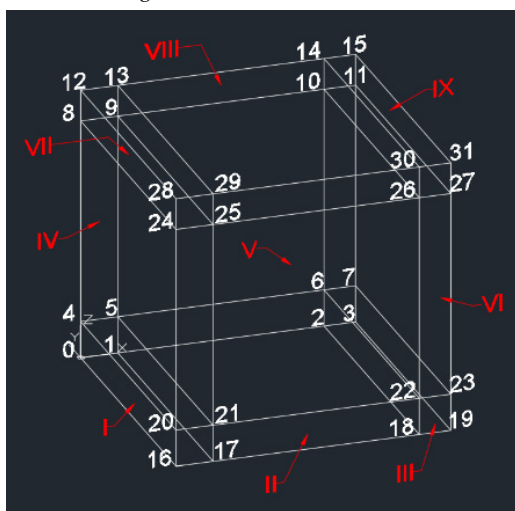
O OpenFOAM possui algoritmos que variam de acordo com a área de estudo desejada. Dentro da linha de pesquisa da transferência de calor tem-se o algoritmo *buoyantSimpleFoam* que é aplicado para escoamentos em regime permanente, com massa específica variável, podendo inserir modelos de turbulência e utiliza o método dos volumes finitos para a discretização do domínio espacial das equações. O algoritmo permite a alteração dos parâmetros para ajustá-lo a utilizar a aproximação de Boussinesq. Portanto, o *buoyantSimpleFoam* possibilita a solução numérica para a avaliação térmica de sistemas de refrigeração.

De forma geral, os algoritmos do OpenFOAM funcionam com diferentes pastas que dividem os parâmetros de simulação de acordo com sua finalidade. Esses parâmetros podem ser editados ajustando a simulação para o caso que se deseja investigar.

Para a reprodução do escoamento condicionado termicamente na sala proposta no trabalho do Youssef *et al.* (2018) usando o software OpenFOAM, é necessária a configuração do arquivo *blockMeshDict* de modo a definir os pontos que representam

os vértices da geometria, vide Fig. 2. As faces formadas pelos vértices da geometria podem ser nomeadas e, assim, implementar particularidades de cada região de acordo com a simulação. Conforme apresentado na Fig. 2, os números cardinais referem-se aos vértices da geometria, enquanto os números romanos indicam os blocos formados entre esses vértices. Os blocos são utilizados para caracterizar as dimensões de entrada e saída de ar.

Figura 2 - Geometria da malha



Fonte: o autor.

O modelo de turbulência RNG  $k-\epsilon$  é aplicado devido ao seu bom desempenho comprovado em termos de convergência e gasto computacional quando aplicado para escoamentos em ambientes fechados e estáveis (YOUSSEF *et al.*, 2018). O fluxo térmico nas paredes e no teto é configurado como  $25 \text{ W/m}^2$  que representa o carregamento térmico externo na sala. Já o fluxo térmico no piso é adotado com o valor de  $60 \text{ W/m}^2$  representando a carga térmica interna da sala. O fluxo de calor é considerado constante para todos os casos.

Para avaliar a performance de sistemas de refrigeração dentro de um espaço 2D, Youssef *et al.* (2018) dividem a investigação em seis casos variando os parâmetros de entrada de ar no ambiente,

O espaço analisado possui altura e comprimento de 2,44 m. Deve-se lembrar que o modelo é bidimensional, portanto, a coordenada de profundidade é considerada unitária para a análise. A dimensão da abertura de entrada de ar varia conforme o caso analisado e está situada no canto superior da parede (bloco VII), enquanto a saída de ar possui dimensão de 8,0 centímetros e localiza-se na parede oposta à entrada, na parte inferior da parede (bloco III). O estudo da dependência da malha indica que uma malha não uniforme de 44x44 volumes é satisfatória para as simulações (YOUSSEF *et al.*, 2018).

Após a determinação e ajuste dos parâmetros de entrada para a simulação, é necessário a aplicação de comandos do OpenFOAM no terminal do Linux para realizar o processamento dos dados. A primeira etapa é gerar a malha configurada no *blockMeshDict* utilizando o comando *blockMesh* no terminal. A operação *checkMesh* verifica se não existem erros na malha gerada. A solução numérica é obtida ao implementar o comando *buoyantSimpleFoam* que realiza os cálculos em busca da convergência do processamento de dados.

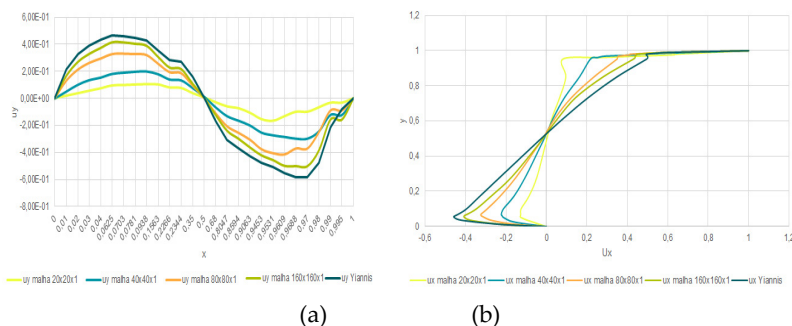
A análise visual dos resultados é realizada no programa *paraView* sob o comando *paraFoam* no terminal do Linux. Desta forma, torna-se possível visualizar e extrair dados referentes à simulação. Outra possibilidade é exportar os dados para planilhas e gerar gráficos de velocidade, temperatura ou pressão referentes ao escoamento.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1. Escoamento em cavidade com tampa deslizante

Com a simulação da cavidade com tampa deslizante obtêm-se valores referentes a velocidade vertical, a velocidade horizontal e a vorticidade. Para verificar a influência do refinamento da malha, compara-se os resultados das quatro divisões de malha com os valores de referência. Na Fig. 3 (a) é apresentada a comparação da velocidade vertical para cada divisão de malha. Já na Fig. 3 (b) é apresentada a comparação da velocidade no sentido horizontal.

Figura 3 - Comparação dos perfis de velocidade vertical em  $y/L=0,5$  (a) e Comparação dos perfis de velocidade horizontal, em  $x/L=0,5$  (b)



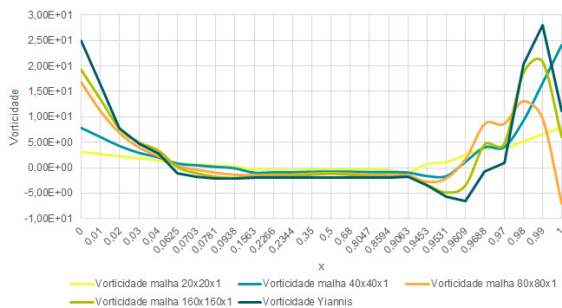
Fonte: o autor.

Nota-se que quanto maior a divisão da malha, mais próximo do valor de referência chegam os resultados. A vorticidade auxilia na melhor identificação de onde tem estruturas turbilhonares no escoamento e os locais que possuem maiores deformações em relação ao cisalhamento em um escoamento, facilitando a visualização. Fisicamente é uma variável mais sensível ao cálculo numérico possuindo mais flutuações, pois sua formulação é uma combinação de duas derivadas. Os resultados nos quais a vorticidade não muda mais com o refinamento da malha indica que a resolução numérica está correta. Na Fig. 4 nota-se que os resul-



tados tendem aos resultados do trabalho de referência, mas próximo às paredes, ainda é necessário refinar ainda mais a malha.

Figura 4 - Comparação da vorticidade em z, em  $y/L=0,5$



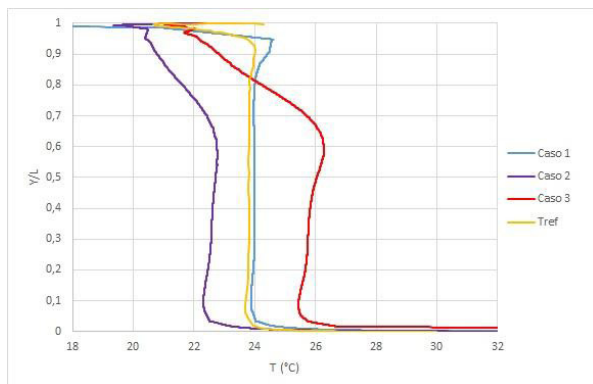
Fonte: o autor.

### 3.2. Escoamentos com de ar-condicionado

O perfil de temperatura apresentado por Youssef *et al.* (2018) indica proximidade entre os três casos, portanto, um único perfil de referência é utilizado na Fig. 5, sendo denominado como Tref. Nota-se que o caso 1, cuja temperatura de insuflamento é de  $14^{\circ}\text{C}$ , aproxima-se da referência. Entretanto, os casos 2 e 3 divergem do resultado esperado, pois o perfil está deslocado do valor desejado, além de apresentar curvaturas que destoam do perfil almejado. Portanto, é necessário reavaliar as constantes e os coeficientes do modelo de turbulência utilizado, as funções de interpolação, além de investigar o refinamento da malha para corrigir as diferenças nos resultados.

A comparação do perfil de velocidade é apresentada na Fig. 6. Assim como a análise do perfil de temperatura, o perfil de velocidade é verificado em  $X/L = 0,5$  do ambiente simulado ao longo do eixo vertical. Os resultados indicam que para o caso 1, o perfil de velocidade se aproxima do esperado em relação ao contorno do perfil. Entretanto, existe uma distância entre os valores da velocidade ao longo do eixo vertical quando comparados com a referência.

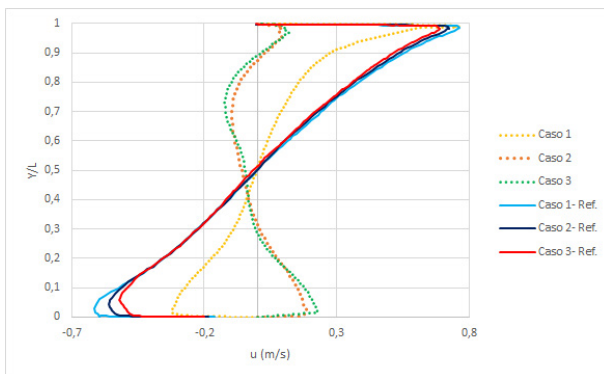
Figura 5 - Perfil de temperatura para diferentes casos de temperatura de insuflamento em  $X/L=0,5$



Fonte: o autor.

No caso 2 e 3 essa distância é maior do que o caso 1 e ainda possui um efeito espelhado do perfil de velocidade na metade inferior da sala. Sendo assim, é necessário melhor refinamento da malha na superfície que representa o piso, além de ajustes nas condições de contorno.

Figura 6 - Perfil de velocidade para diferentes casos de temperatura de insuflamento em  $X/L=0,5$



Fonte: o autor.

## 4. CONCLUSÕES

A partir da aplicação do algoritmo no software OpenFOAM, a simulação de um ambiente refrigerado com variação dos parâmetros de entrada é analisada. Desta forma, investiga-se o impacto da configuração do sistema de refrigeração no conforto térmico e no modo de resfriamento da sala.

Os resultados esperados apresentaram variações aos valores de referência. Novas simulações devem ser realizadas para avaliar possíveis incoerências na aplicação do algoritmo. Os coeficientes de turbulência devem ser ajustados, assim como a definição da malha para a simulação.

Após a validação dos parâmetros de temperatura e velocidade do escoamento, deve-se iniciar o processo de validação em relação aos parâmetros de conforto térmico para o ambiente simulado. Para a otimização de sistemas de ventilação, simulações com um modelo split de ar-condicionado devem ser realizadas com o intuito de avaliar as zonas de recirculação e, desta forma, analisar o conforto térmico.

## REFERÊNCIAS

- ASHRAE. **ASHRAE STANDARD 55**: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. [S. l.], 2013. ISSN 1041-2336.
- BORRO, L. *et al.* The role of air conditioning in the diffusion of Sars-CoV-2 in indoor environments: A first computational fluid dynamic model, based on investigations performed at the vatican state children's hospital. **Environmental Research**, Amsterdam, n. 193, p. 110343, 2021.
- BRASIL. Ministério da Saúde. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. **Serviços Odontológicos**: Prevenção e controle de riscos. Brasília: Ministério da Saúde, 2006.
- ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Mecânica dos Fluidos**: Fundamentos e Aplicações. 6. ed. New York: McGraw-Hill Companies, 2011.

CHENG, Y.; LIN, Z. Experimental study of airflow characteristics of stratum ventilation in a multi-occupant room with comparison to mixing ventilation and displacement ventilation. **Indoor Air**, n. 25, p. 662–671, 2015.

OPENFOAM. **About OpenFOAM**. 2021. Disponível em: <https://www.openfoam.com>. Acesso em: 1 dez. 2022.

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

YIANNIS, P. **2-D Lid-Driven Cavity Flow Benchmark Solutions**. 2015. Disponível em: <https://www.acenumerics.com/the-benchmarks.html>.

YOUSSEF, A. A. *et al.* Studying comfort in a room with cold air system using computational fluid dynamics. **Ain Shams Engineering Journal**, n. 9, p. 1753-1762, 2018.

ZHOU, H. *et al.* Integrated analysis of CFD data with k-means clustering algorithm and extreme learning machine for localized HVAC control. **Building and Environment**, n. 36, p. 901-908, 2001.

ZHUANG, R. *et al.* CFD study of the effects of furniture layout on indoor air quality under typical office ventilations schemes. **Build Simul**, n. 7, p. 263-275, 2014.

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

Leandro Neves de Assis<sup>1</sup> (leandroneves@discente.ufg.br)

Marlipe Garcia Fagundes Neto<sup>1</sup> (marlipe@ufg.br)

<sup>1</sup>UFG - Universidade Federal de Goiás

**Resumo:** O seguinte trabalho tem como objetivo investigar a disposição dos materiais de absorção sonora em uma sala de aula padrão do prédio de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Goiás (UFG) através dos parâmetros acústicos obtidos. Para a realização dos experimentos, determinou-se a quantidade de Placas de Absorção Sonora (PAS) e as distribuiu de forma homogênea nas paredes laterais da sala. Baseado na ISO 3382-2 foram selecionados 2 e 3 pontos distintos para a fonte sonora e receptor, respectivamente. O planejamento experimental foi criado e otimizado utilizando a técnica de Mistura e, em sequência, os dados obtidos foram analisados pela técnica da Análise de Variância (ANOVA). A comparação dos leiautes quanto à disposição das placas, possibilitará a elucidação de quais posições melhorarão o tratamento acústico da sala estudada. Ao final, é possível concluir que o desempenho acústico de uma sala de aula pode ser melhorado considerando outros fatores além da quantidade de PAS.

**Palavras-chave:** acústica de salas; leiaute; tempo de reverberação; planejamento experimental.

## 1. 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.

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, 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.

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 comparadas aos cálculos analíticos (BISTAFÁ; BRADLEY, 2001).

Apesar de diversos países já possuírem normas e diretrizes acústicas para projetos acústicos de espaços educacionais, o Brasil não possui regulamentação ou normas indicando requisitos

acústicos que devam ser atendidos em salas de aula ou outros espaços educacionais. A única norma que contém um parâmetro objetivo é a norma brasileira ABNT NBR 10152: 2017 que estabelece valores de referência de níveis de pressão sonora para salas de aula, entretanto não trata de outros importantes parâmetros acústicos, como Tempo de Reverberação (TR, sendo T20 e T30 o tempo necessário para que as reflexões diminuam 20 e 30 dB, respectivamente), Tempo de Decaimento Inicial (*Early Decay Time* - EDT), Índice de Transmissão da Fala (*Speech Transmission Index* - STI), entre outros.

Sabendo disso, levantamos a hipótese do quanto a disposição dos materiais de absorção sonora influenciam nas características acústicas de um leiaute de uma sala de aula.

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.

## 2. METODOLOGIA

O estudo experimental deste trabalho consiste no método para medição dos parâmetros acústicos de um ambiente fechado e deve ser norteadado pela NBR 3382-2, 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 pelo planejamento fatorial completo geral (MONTGOMERY, 2008), 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, 2008), cuja, estatisticamente, permite inferir se dois ou mais tipos de leiautes realmente apresentam diferenças significativas.

Diante do exposto, para realizar os experimentos dos diferentes leiautes a serem estudados, utilizou-se a sala de aula 108 do Prédio B5 da UFG, Fig. 1, que possui carteiras, mesas, quadros e demais objetos característicos do ambiente de aprendizado.

Figura 1 - Perspectiva da sala do ponto de vista 1 (a) e do ponto de vista 2 (b)



(a)



(b)

Fonte: o autor.

Os materiais empenhados no experimento foram um altifalante omnidirecional dodecaedro OmniPower 4292-L, um sonômetro tipo 2250, que foi recém calibrado, ambos da marca Bruel & Kjaer e espumas acústicas tipo caixa de ovo, adquiridas da JC Decor (MG) com densidade D28 em Poliuretano, como expostos na Fig. 2.

Figura 2 - Materiais utilizados

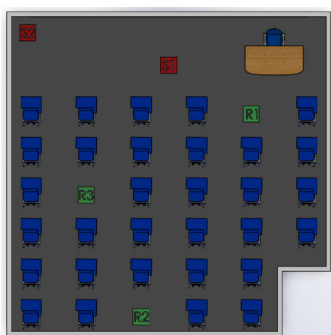


Fonte: o autor.



Baseado na ISO 3382-2 foram selecionados 2 pontos distintos para a fonte e 3 pontos para o receptor, o posicionamento é determinado aleatoriamente. A Fig. 3 ilustra os posicionamentos, sendo, S1 e S2 o posicionamento da fonte, e R1, R2 e R3 o posicionamento do receptor. Portanto, para cada leiaute foram realizadas 6 medições. Destaca-se que apesar da escolha aleatória da posição da fonte e do receptor, foi feita uma marcação no piso para auxiliar nas réplicas do ensaio.

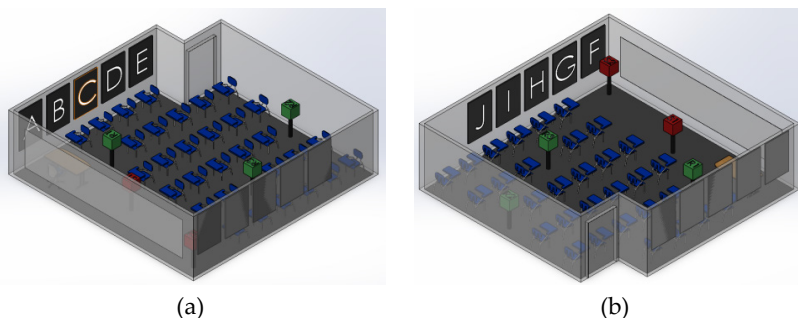
Figura 3 - Representação dos pontos utilizados para fonte e receptor



Fonte: o autor.

Para o posicionamento do PAS, segmentou-se as paredes laterais da sala e nomeou os segmentos de A-J, conforme Fig. 3.

Figura 4 - Representação dos segmentos utilizados para as PAS do ponto de vista 1 (a) e do ponto de vista 2 (b)



(a)

(b)

Fonte: o autor.

A disposição das PAS foi padronizada considerando sua dimensão. As placas utilizadas possuem 1,85 m de comprimento por 1,25 m de largura, dessa forma, foram orientadas tendo seu comprimento paralelo ao eixo da altura da sala.

O planejamento do experimento foi realizado utilizando o programa computacional estatístico Minitab®, bem como a análise do experimento. Inicialmente, através da técnica de mistura, criou-se um planejamento do qual todas as configurações utilizariam 5 PAS. A Tab. 1 demonstra o resumo do experimento:

Tabela 1 - Resumo do Experimento de Mistura

Tipo:	Vértices Extremos
Componentes:	10
Grau:	1
Réplicas:	3
Total da mistura	5
Limite inferior:	0
Limite superior:	1
Variáveis do processo:	0
Pontos do experimento:	756

Fonte: o autor.

Notou-se que a quantidade de pontos do experimento demandaria um tempo excessivo, desta forma optou-se pela utilização do Experimento Ótimo. Pelo critério do D-ótimo (determinante de  $XTX = 0,0000001$ ) e estimando 15 medições para o experimento, criou-se o experimento otimizado, seguindo Tab. 2.

Tabela 2 - Experimento Ótimo

Ordem Pad	Ordem Ens	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	Config
497	3	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	CEGHI
277	6	0	1	1	1	0	0	1	0	0	1	BCDGI
143	10	1	0	1	0	0	1	0	0	1	1	ACFIJ
365	14	0	1	0	0	0	1	1	1	0	1	BFGHJ
544	39	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	ABCFCG
574	55	1	0	1	1	1	0	0	1	0	0	ACDEH
461	76	1	1	0	0	1	0	0	1	1	0	ABEHI
727	80	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	DFHIJ
676	83	1	0	0	0	1	0	1	0	1	1	AEGIJ
589	84	0	0	1	0	1	1	0	1	0	1	CEFHIJ
196	85	0	0	0	1	1	1	1	0	1	0	DEFGI
507	110	1	1	0	1	1	0	0	0	0	1	ABDEJ
743	121	1	0	0	1	0	0	1	1	1	0	ADGHI
451	160	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1	BCHIJ
655	523	0	1	1	1	0	1	0	0	1	0	BCDFI

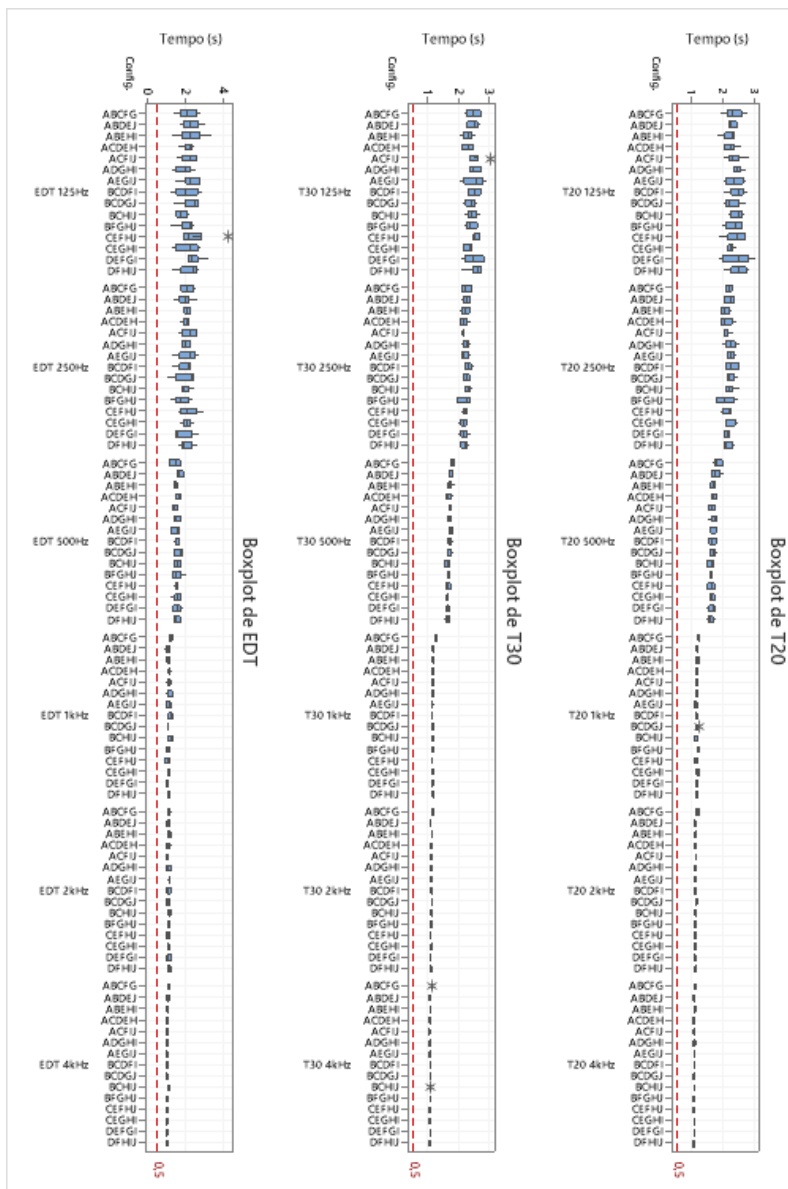
Fonte: o autor.

Após os experimentos, utilizou-se a Regressão Fatorial Geral e o editor de planilhas Microsoft Excel® para analisar os dados coletados.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O gráfico Boxplot apresentado a seguir (Fig. 5) sumariza os TR obtidos para T20, T30 e EDT nas faixas de frequência de 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz e 4000 Hz.

Figura 5 - Boxplot do TR para T20, T30 e EDT



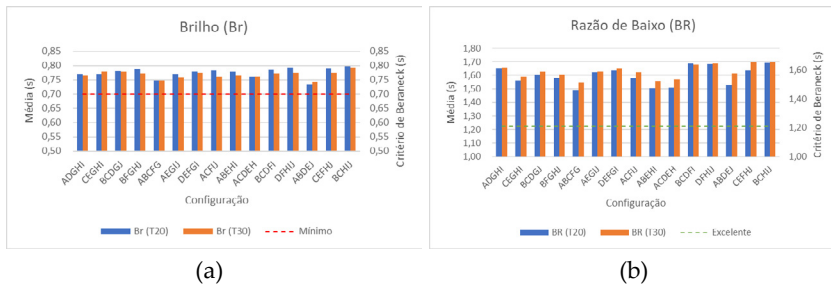
Fonte: o autor.

Inicialmente, destaca-se a similaridade das respostas para T20 e T30 e a diferença das respostas desses parâmetros ao comparar com a resposta para EDT. Apesar de serem conceitos similares, enquanto o T20 e T30 estão mais ligados às propriedades físicas do espaço, o EDT está mais ligado à reverberação percebida pelo ouvinte. Além disso, nota-se que para médias (500 Hz e 1000 Hz) e altas frequências (2000 Hz e 4000 Hz) o boxplot é mais achatado, o que indica uma baixa variabilidade e desvio padrão. Ainda, apresentam valores mais baixos para a média e o valor mediano, principalmente as altas frequências. Por outro lado, as baixas frequências (125 Hz e 250 Hz) apresentam alta dispersão.

Evidenciou-se ainda, que mesmo com o TR baixo nas altas frequências ao comparar com as baixas frequências, ele ainda se encontra distante do recomendado em normas. Entretanto, ao considerar outros parâmetros, como Brilho (Br), Razão de Baixos (BR), Clareza (C50) e Definição (D50), observou-se que apesar dos altos valores de TR, os parâmetros citados possuem comportamentos satisfatórios.

Ante o exposto, o Br – característica subjetiva que relacionada energia sonora das frequências agudas – do experimento apresentou-se em sua totalidade superior ao Critério de Beranek ( $Br > 0,70$ ), como observado na Fig. 6a, bem como a BR – característica subjetiva associado a presença dos sons graves relativamente aos sons médios – que também obteve resultados satisfatórios por estar acima do indicado ( $BR > 1,20 =$  Excelente) como exposto na Fig. 6b.

Figura 6 - Brilho (Br) e Razão de Baixo (BR)



Fonte: o autor.

Paralelo a isso, ainda com base nos Critérios de Beranek, ao analisar C50 – parâmetro subjetivo que relaciona as primeiras reflexões com as reflexões tardias – constatou-se que, em sua maioria, as baixas frequências são classificadas como “pobre” e as médias e altas frequências em “regular”, como apresentado na Figura 7a. Para D50 – parâmetro subjetivo que determina o grau em que um ouvinte pode distinguir sons ao ouvir a palavra falada – verificou-se que, em sua maioria, obteve classificação “regular”, tendo poucas frequências e configurações na classificação “pobre”, como exposto na Fig. 7b.

Figura 7 - Clareza (C50) e Definição (D50)



Fonte: o autor.

Tabela 3 - Relação de melhores configurações por parâmetro/frequência

	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz
T20	ABEHI	BFGHJ	BFGHJ	AEGIJ	ABDEJ	ACDEH
T30	ACDEH	CEGHI	BCHIJ	CEFHJ	DEFGI	DFHIJ
EDT	BCHIJ	BFGHJ	ACFIJ	ABDEJ	ACFIJ	AEGIJ

Fonte: o autor.

Por fim, restou avaliar qual configuração obteve melhor performance acústica em relação ao TR. No geral, como média, a configuração BFGHJ é a que mais se repete (3 vezes), seguido pelas configurações AEGIJ, ACFIJ, ACDEH, ABDEJ e BCHIJ (2 vezes), como observado na Tab. 3.

#### 4. CONCLUSÕES

Para o estudo em questão, foi alcançado o objetivo de investigar experimentalmente a influência da posição de materiais de absorção sonora na característica acústica de salas de aula. A qualidade acústica das salas foi verificada aplicando-se os parâmetros T20, T30, EDT, Br, BR, C50 e D50.

Observou-se que o TR para baixas frequências é alto e apresenta grande dispersão, isso traz uma certa imprevisibilidade, pois ora se tem valores muito baixos, ora se tem valores muito altos. É fácil de ver que quando essa variabilidade é muito grande, a previsibilidade é muito menor. Para as altas médias e altas frequências os valores reduzem consideravelmente, mas ainda sim apresentam-se distantes do ideal.

Ao considerar outros parâmetros subjetivos, o desempenho acústico se mostra mais eficaz, uma vez que o Br e BR estão de acordo com o critério adotado. Todavia, apesar de estar com uma classificação mediana, o C50 e D50 se mostram como parâmetros a serem melhorados.

O estudo seguinte resultou na indicação da configuração BF-GHJ como a mais eficiente para a sala em estudo, mostrando que a configuração com as placas mais próximas a fonte forneceu o melhor desempenho acústico.

## 5. AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer à PRPG/UFG, ao PPGMEC/UFG e ao CNPQ 434921/2018-1 “Acústica de Salas: Influência e modelagem da posição de materiais de absorção sonora na característica acústica de salas de aula”. Agradeço à oportunidade que me foi dada de desenvolver um trabalho criterioso e poder contribuir de alguma forma para o desenvolvimento de pesquisas no Brasil.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 3382: Acústica – Medição de parâmetros de acústica de salas**. Rio de Janeiro, 2017.

BISTAFA, S. R.; BRADLEY, J. S. Predicting reverberation times in a simulated classroom. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 108, 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 de modelagem**. São Paulo: Blucher, 2016.

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. 7. ed., New York: Wiley, 2008. 656 p.



# MODELAGEM NUMÉRICA E COMPUTACIONAL DE ESCOAMENTOS SOBRE UM AEROFÓLIO USANDO A METODOLOGIA IMERSPEC

Lucas Marques Monteiro<sup>1</sup> (lucas\_monteiro@discente.ufg.br)

Felipe Pamplona Mariano<sup>1</sup> (fpmariano@ufg.br)

<sup>1</sup>Laboratório de Engenharia Térmica e de Fluidos (LATEF/UFG)

**Resumo:** No presente trabalho propõe-se verificar a potencialidade da metodologia IMERSPEC para a modelagem numérica e computacional de escoamentos bidimensionais sobre aerofólios. A metodologia IMERSPEC é resultado do acoplamento do método pseudo-espectral de Fourier e do método da fronteira imersa. Foram realizadas simulações de escoamentos sobre um aerofólio NACA 0012 para número de Reynolds igual a 1000, posicionado em um ângulo de ataque de 10°. Do procedimento de discretização espacial, obtém-se convergência e boa concordância dos coeficientes de sustentação e arrasto em relação aos trabalhos de referência. O comportamento qualitativo dos escoamentos sobre o aerofólio, sob a influência do ângulo de ataque, é avaliado pelos campos de pressão e vorticidade. Esses resultados, que se mostram condizentes com o comportamento físico do problema analisado, enfatizam a capacidade da metodologia IMERSPEC na solução de escoamentos dessa natureza.

**Palavras-chave:** escoamentos sobre aerofólios; método pseudo-espectral de Fourier; método da fronteira imersa.

## 1. INTRODUÇÃO

O escoamento de um fluido viscoso sobre um aerofólio resulta em uma interação fluido-estrutura que promove o aparecimento de uma força resultante. Na aerodinâmica, a depender da aplicação, essa força garante o efeito físico da sustentação e do arrasto em aeronaves (ANDERSON, 2017).

Por meio de métodos e recursos numéricos e computacionais, a Dinâmica dos Fluidos Computacional (DFC) propõe a solução de modelos matemáticos formados pelas equações de Navier-Stokes e pela equação da continuidade, que juntas, modelam fisicamente os escoamentos de um fluido. O avanço dos recursos computacionais, a necessidade de metodologias mais acuradas, com baixo custo computacional e que permitam escalabilidade abrem caminhos para a aplicação de metodologias de alta ordem de convergência, à exemplo da metodologia IMERSPEC, proposta por Mariano *et al.* (2022).

Em problemas da fluidodinâmica, a metodologia IMERSPEC permite determinar soluções numéricas com elevada acurácia, baixo custo computacional e com alta ordem de convergência, em relação à outras metodologias, à exemplo do método dos volumes finitos de baixa ordem de convergência (NASCIMENTO *et al.*, 2020).

Essa metodologia realiza a modelagem de escoamentos sobre geometrias complexas e móveis usando malha cartesiana sob condições de contorno não periódicas; o desacoplamento das variáveis pressão-velocidade eliminando a necessidade de resolver a equação de Poisson pelo procedimento de projeção; pós-processamento para a recuperação da variável pressão, satisfazendo a equação da continuidade com erros da ordem de arredondamento de máquina.

Dessa forma, no presente trabalho objetiva-se validar a aplicabilidade da metodologia IMERSPEC para a solução de escoamentos bidimensionais e incompressíveis sobre aerofólios simétricos, para baixos números de Reynolds,  $Re \leq 0$  ( $10^3$ ). Essa é a faixa, experimentalmente comprovada, para escoamentos relacionados a insetos voadores, devido a sua baixa velocidade e pequeno tamanho característico. Além disso, os micro veículos aéreos (MAVs) de asa oscilante, que vem popularizando-se atualmente em ambientes industriais, operam eficientemente sob escoamentos com essas características (KURTULUS, 2015).

## 2. MODELAGEM MATEMÁTICA

O comportamento fluidodinâmico de escoamentos sobre corpos imersos, à exemplo dos aerofólios, é modelado pelo conjunto das equações de Navier-Stokes (Eq. 1) e pela equação da continuidade (Eq. 2), resolvidas ao longo de todo o domínio euleriano e escritas em notação indicial,

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial(u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + f_i \quad (1)$$

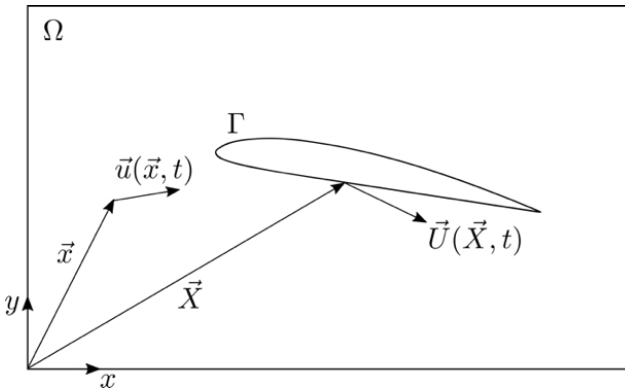
$$\frac{\partial u_i}{\partial x_j} = 0, \quad (2)$$

onde  $t$  é o tempo,  $u_i(\vec{x}, t)$  são as componentes do vetor velocidade em  $[m/s]$ ,  $\vec{x}$  é o vetor posição de um ponto discreto no domínio euleriano,  $p$  é o campo de pressão estática em  $[N/m^2]$ ,  $\rho$  é a massa específica do fluido em  $[Kg/m^3]$ ,  $\nu$  é a viscosidade cinemática do fluido em  $[m^2/s]$  e  $f_i = f_i^*/\rho$  é o termo de força, onde  $f_i^*$  é dado em  $[N/m^3]$ .

O modelo matemático é restrito a escoamentos bidimensionais, incompressíveis, isotérmicos, fluidos newtonianos e as propriedades físicas do fluido são constantes. A modelagem virtual da interface imersa do aerofólio é realizada pelo método da fron-

teira imersa, a partir do cálculo do termo de força  $f_i$  (PESKIN, 2002). Utiliza-se dois domínios de cálculo, independentes: o domínio euleriano ( $\Omega$ ), cartesiano e fixo, e o domínio lagrangiano ( $\Gamma$ ), dado pelos pontos discretos que constituem a interface do corpo, conforme apresentados pela Fig. 1.

Figura 1- Domínios de cálculo da metodologia da fronteira imersa: domínio euleriano e domínio lagrangiano, onde  $\vec{u}(\vec{x}, t)$  é o vetor velocidade de um ponto euleriano, posicionado em  $\vec{x}$  e  $\vec{U}(\vec{X}, t)$  é o vetor velocidade de um ponto lagrangiano, posicionado em  $\vec{X}$



Fonte: o autor.

No presente trabalho, determinar  $f_i$  corresponde ao procedimento de impor a condição de contorno de não deslizamento sobre os pontos discretos que compõem o domínio lagrangiano, informando ao escoamento a presença do aerofólio imerso a ele. Portanto, a contribuição de  $f_i$  torna-se importante nos pontos eulerianos próximos aos pontos lagrangianos, calculada por,

$$f_i(\vec{x}, t) = \sum_{\Gamma} D_h(\vec{x} - \vec{X}) F_i(\vec{X}, t) \Delta s^2, \quad (3)$$

onde  $F_i(\vec{X}, t)$  é a força lagrangiana,  $\Delta s$  é o espaçamento entre os pontos lagrangianos discretizados e  $D_h(\vec{x} - \vec{X})$  é a função de distribuição, proposta no trabalho de Mariano *et al.* (2022).

A força lagrangiana, que representa, fisicamente, a força que o corpo imerso exerce sobre o escoamento, é dada por,

$$F_i(\vec{x}, t) = \frac{U_i^{FI} - U_i^*}{\Delta t}, \quad (4)$$

onde  $U_i^{FI} = 0$  é a velocidade lagrangiana imposta sobre os pontos que compõem o aerofólio e  $U_i^*$  é uma velocidade lagrangiana, estimada pelo procedimento de interpolação do parâmetro temporário  $u_i^*$ .

O método da fronteira imersa, usada no presente trabalho, é baseado no modelo da múltipla imposição da força (*Multi-Direct Forcing*) e está detalhada nos trabalhos de Wang; Fan; Luo (2008). A determinação de  $f_i(\vec{x}, t)$  é realizada por um procedimento iterativo, cujo objetivo é melhorar a precisão do cálculo de  $u_i(\vec{x}, t)$  e, portanto, aumentar a acurácia da imposição da condição de contorno de não deslizamento sobre os pontos lagrangianos.

O modelo matemático, dado pelas Eqs. 1 e 2, é transformado do espaço físico para o espaço espectral, usando o método pseudo-espectral de Fourier (CANUTO *et al.*, 2006). Numericamente, essa transformação é realizada sobre as variáveis velocidade e pressão, pela aplicação do algoritmo da Transformada Rápida de Fourier (FFT) (COOLEY; TUKEY, 1965).

As equações de Navier-Stokes (Eq. 1), transformadas, tornam-se,

$$\left[ \frac{\partial}{\partial t} + \nu k^2 \right] \hat{u}_i(\vec{k}, t) = \mathcal{P}_{im} \left[ \hat{f}_m(\vec{k}, t) - ik_j \int_{\vec{k}=\vec{r}+\vec{s}} \hat{u}_m(\vec{r}, t) \hat{u}_j(\vec{k}-\vec{r}, t) d\vec{r} \right], \quad (5)$$

onde  $\hat{u}(\vec{k}, t)$  é a velocidade no espaço espectral,  $k^2 = k_j k_j$  é a norma do vetor número de onda  $\vec{k}$  e  $\mathcal{P}_{im}$  é o tensor projeção, definido em Silveira-Neto (2020). O termo não linear no espaço espectral, torna-se, conforme mostrado, uma integral de convolução, resolvida pelo procedimento pseudo-espectral de Fourier.

A equação da continuidade (Eq. 2), transformada, é dada por,

$$ik_j \hat{u}_j = 0. \quad (6)$$

No presente trabalho, o acoplamento do método da fronteira imersa e do método pseudoespectral de Fourier resulta na metodologia IMERSPEC, proposta no trabalho de Mariano *et al.* (2022).

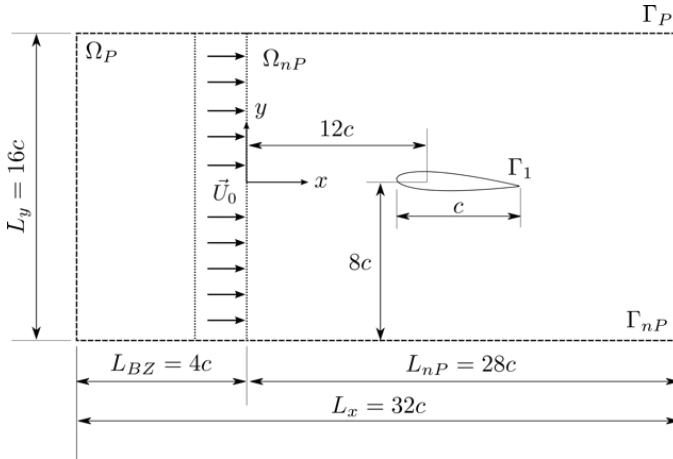
No espaço físico, as variáveis do modelo matemático são espaciais. No espaço espectral, as variáveis transformadas são discretizadas em função do conjunto de vetores números de onda,  $\vec{k}$ . A discretização temporal é realizada pelo método de Runge-Kutta de quarta ordem de convergência temporal, com seis passos (RK46), explicitado em Allampalli *et al.* (2009).

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

No presente trabalho avalia-se a capacidade da metodologia IMERSPEC em representar e modelar escoamentos incompressíveis e bidimensionais sobre um aerofólio simétrico NACA 0012.

O domínio usado nas simulações é apresentado pela Fig. 2, adimensionalizado pelo comprimento da corda do aerofólio,  $c$ . A zona de amortecimento e a zona de forçagem, juntas, possuem comprimento  $L_{BZ} = 4c$ . O comprimento do domínio físico, onde a fluidodinâmica do escoamento se desenvolve e os resultados físicos são obtidos, é  $L_{nP} = 28c$ . O domínio lagrangiano é dado pelos pontos discretos do aerofólio, representado por  $\Gamma_1$ .

Figura 2 - Domínio proposto para simulação de escoamentos sobre o aerofólio



Fonte: o autor.

Os parâmetros de simulação são exibidos na Tab. 1. Os resultados apresentados nesta seção são obtidos de simulações realizadas em um computador com processador Intel Xeon (E3-1270) com 3,50 [GHz] de velocidade e 16,0 [GiB] de memória RAM. O tempo total de simulação, adimensionalizado, é  $t/U_0c = 100$  e a viscosidade cinemática do fluido é calculada por  $\nu = U_0c/Re$ .

Tabela 1 - Parâmetros de simulação

Número de Reynolds	$Re = 1000$
Corda do aerofólio	$c = 1$ [m]
Massa específica do fluido	$\rho = 1,00$ [kg/m <sup>3</sup> ]
Velocidade de corrente livre	$U_0 = 1,00$ [m/s]
Número de interações do <i>Multi-Direct Forcing</i>	NIT = 50
CFL	CFL = 0,25
Número de pontos lagrangianos	$N_L = 300$

Fonte: o autor.

Na Tab. 2 são apresentados os resultados médios dos coeficientes adimensionais aerodinâmicos (arrasto e sustentação)

sobre o aerofólio, posicionado em um ângulo de ataque . Esses coeficientes são calculados por,

$$C_i = \frac{2F_{ci}}{\rho U_0^2 c}, \quad (7)$$

onde  $F_{ci}$  é dado por,

$$F_{ci} = -\rho \sum_{it=1}^{NIT} \sum_{p=1}^{N_L} F_i(\vec{X}, t) \Delta x \Delta s. \quad (8)$$

A força de arrasto e a força sustentação, exercida sobre o aerofólio em [N], são calculadas pela Eq. 8, considerando o somatório da parcela da força lagrangiana  $F_i(\vec{X}, t)$ , na direção  $x$  e  $y$ , respectivamente, aplicada sobre cada ponto lagrangiano e ao longo de cada interação do *Multi-Direct Forcing*.

O teste de refinamento de malha do domínio euleriano é realizado para três níveis de malhas:  $N_x = 512 \times N_y = 256$ ,  $N_x = 1024 \times N_y = 512$  e  $N_x = 2048 \times N_y = 1024$ , onde  $N_x$  é o número de pontos de colocação que discretiza o comprimento  $L_x$  e  $N_y$  é o número de pontos de colocação que discretiza o comprimento  $L_y$ . Na Tab. 2 são apresentados os resultados dos coeficientes médios para os três diferentes níveis de refinamento. A média dos coeficientes é realizada no intervalo de tempo  $t/U_0 c = [70:100]$ .

Tabela 2 - Coeficientes médios de sustentação  $C_l$  e arrasto  $C_d$  para diferentes níveis de malha

Malha	$C_l$	$C_d$
512 x 256	0,5897	0,3670
1024 x 512	0,5264	0,2287
2048 x 1024	0,4173	0,1881
KOUSER <i>et al.</i> (2021)	0,4184	0,1661

Fonte: o autor.



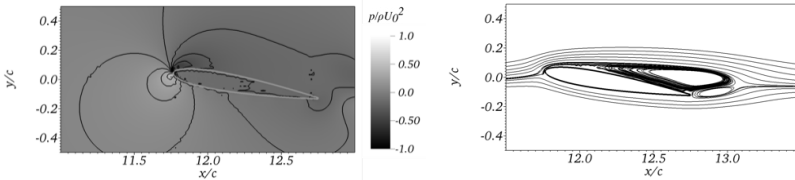
Nota-se que  $C_l$  e  $C_d$  apresentam convergência em relação aos resultados propostos por Kouser *et al.* (2021), à medida que se aumenta o nível de refinamento do domínio. Uma boa concordância de  $C_l$  e  $C_d$  é obtida para a malha mais refinada,  $N_x = 2048$  x  $N_y = 1024$ , com uma diferença relativa percentual de 0,26% de  $C_l$  e 13,24% de  $C_d$ , em relação aos resultados de referência.

No presente trabalho, a força de arrasto, fisicamente promovida pelos efeitos viscosos e friccionais do escoamento, mostra-se mais influenciada pelo refinamento do domínio, conforme observado pela maior diferença percentual em  $C_d$ . A região adjacente à superfície do aerofólio exige níveis mais refinados de malha, para garantir, com maior acurácia, a condição de contorno de não deslizamento e a representação dos efeitos físicos associados à camada limite.

Na Fig. 3a é apresentado o campo de pressão sobre o aerofólio para  $\alpha = 10^\circ$ . Observa-se a formação de uma região de baixa pressão sobre o extradorso, próxima ao bordo de ataque. A intensificação dessa região ocorre devido ao ângulo de ataque, responsável, portanto, pelo aparecimento da força de sustentação em aerofólios simétricos.

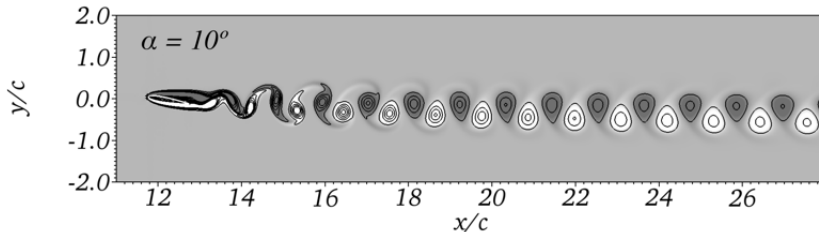
Pelas linhas de corrente, mostradas pela Fig. 3b, evidencia-se a formação de estruturas turbilhonares sobre o extradorso do aerofólio, promovidas pelo descolamento do escoamento. A intensificação do gradiente adverso de pressão, associado ao baixo número de Reynolds, é responsável pelo fenômeno prematuro de descolamento do escoamento, responsável, portanto, pela promoção de estruturas turbilhonares que são, por sua vez, advecadas formando a esteira de von Kármán, conforme ilustrado pela Fig. 4, através do campo de vorticidade.

Figura 3 - (a) Campo de pressão sobre o aerofólio NACA 0012. (b) Linhas de correntes sobre o aerofólio NACA 0012



Fonte: o autor.

Figura 4 - Campo de vorticidade  $-1 \leq \omega c / U_0 \leq 1$  sobre o aerofólio para  $\alpha = 10^\circ$



Fonte: o autor.

## 4. CONCLUSÕES

No presente estudo é apresentada a aplicação e a validação da metodologia IMERSPEC para a simulação numérica e computacional de escoamentos bidimensionais sobre um aerofólio simétrico, submetido a baixos números de Reynolds.

Pelos adimensionais analisados, coeficiente de sustentação e arrasto, nota-se uma boa concordância com os resultados de referência a partir da malha mais refinada,  $N_x = 2048 \times N_y = 1024$ . A visualização dos campos de pressão, vorticidade e as linhas de corrente, para  $\alpha = 10^\circ$ , retratam com confiabilidade os fenômenos físicos esperados.

Investigações mais detalhadas devem ser realizadas para estimar a acurácia da metodologia para escoamentos, agora sob altos números de Reynolds. A implementação de escoamentos tridi-

mensionais e modelos de fechamento de turbulência são opções, que podem ser implementadas à metodologia IMERSPEC para realização de testes e obtenção de resultados futuros.

## 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FURNAS Centrais Elétricas, ao Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico (P&D) da ANEEL e ao Laboratório de Engenharia Térmica e de Fluidos (LATEF) da Universidade Federal de Goiás (UFG) pelo financiamento e apoio ao desenvolvimento do presente trabalho.

## REFERÊNCIAS

- ALLAMPALLI, V.; HIXON, R.; NALLASAMY, R.; SAWYER, S. High-accuracy large-step explicit Runge-Kutta (HALE-RK) schemes for computational aeroacoustics. **Journal of Computational Physics**, v. 228, p. 3837-3850, 2009.
- ANDERSON, J. J. D. **Fundamentals of aerodynamics**. 6. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2017.
- CANUTO, C.; HUSSAINI, M. Y.; QUARTERONI, A.; ZANG, T. A. **Spectral Methods: Fundamentals in Single Domains**. Germany: Springer-Verlag, 2006.
- COOLEY, J. W.; TUKEY, J. W. An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series. **Mathematics of Computation**, v. 19, p. 215-234, 1965.
- KOUSER, T.; XIONG, Y.; YANG, D.; PENG, S. Direct Numerical Simulations on the three-dimensional wake transition of flows over NACA0012 airfoil at  $Re = 1000$ . **International Journal of Micro Air Vehicles**, California, EUA, v. 13, 2021.
- KURTULUS, D. F. On the unsteady behavior of the flow around NACA 0012 airfoil with steady external conditions at  $Re=1000$ . **International Journal of Micro Air Vehicles**, California, EUA, v. 7, n. 3, 2015.
- MARIANO, F. P.; MOREIRA, L.; NASCIMENTO, A. A.; SILVEIRA-NETO, A. An improved immersed boundary method by coupling of the

multi-direct forcing and Fourier pseudo-spectral methods. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 44, p. 1-23, 2022.

NASCIMENTO, A. A.; MARIANO, F. P.; PADILLA, E. L. M.; SILVEIRA-NETO, A. Comparison of the convergence rates between Fourier pseudo-spectral and finite volume method using Taylor-Green vortex problem. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 42, p. 1-10, 2020.

PESKIN, C. S. The immersed boundary method. **Acta Numerica**, v. 11, jan. 2002.

SILVEIRA-NETO, A. da. **Escoamentos turbulentos: análise física e modelagem teórica**. Uberlândia: Composer, 2020.

WANG, Z.; FAN, J.; LUO, K. Combined multi-direct forcing and immersed boundary method for simulating flows with moving particles. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 34, n. 3, p. 283-302, mar. 2008.

# ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E DE TRATAMENTO DE ÁGUA NO SANEAMENTO: COMPARAÇÃO ENTRE UNIDADES COM EQUIPAMENTOS NOVOS E ANTIGOS

Lucas Lauriano da Silva<sup>1</sup> (luke\_rox@hotmail.com)

Alana da Silva Magalhães<sup>1</sup> (alana.magalhaes@ifg.edu.br)

Junio Santos Bulhões<sup>2</sup> (juniobulhoes@gmail.com)

<sup>1</sup>Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Goiás - IFG

<sup>2</sup>Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Mato Grosso - IFMT

**Resumo:** A gestão da manutenção e de ativos é uma área de grande importância nas atividades industriais da atualidade. A gestão é um fator que proporciona uma evolução na realização de processos, e para ter gestão é preciso ter dados, valores, medições. Portanto, foi proposta a implantação e análise dos índices de eficiência energética e de produção em unidades novas e envelhecidas de uma indústria de saneamento localizada em Goiânia – GO. Com a realização da coleta de dados e cálculo dos índices para cada unidade, observou-se que a eficiência energética relacionada aos ativos e sistemas das unidades novas são melhores que os das envelhecidas. Com base nestes valores de eficiência determinados, em conjunto com outros índices, indicadores e ferramentas de análise, é possível avaliar a necessidade de melhoria das unidades envelhecidas.

**Palavras-chave:** eficiência energética; gestão da manutenção; gestão de ativos; indicadores e índices de manutenção; qualidade industrial.

## 1. INTRODUÇÃO

O saneamento básico no Brasil vem sofrendo evoluções significativas nas últimas décadas, principalmente no que se refere ao atendimento para a população de água potável e esgotamento sanitário. Na região centro-oeste o acesso da população à água tratada chega a 90,9% e para o tratamento de esgoto a população atendida é de 59,5%. Com relação ao consumo de energia elétrica do setor de saneamento básico, o valor chega a 12,9 TWh/ano, correspondendo a mais de 2,7% do consumo total do sistema elétrico nacional brasileiro e chegando a ser a terceira maior despesa das empresas de saneamento (BRASIL, 2019).

Um dos fatores que pode afetar a eficiência dos ativos nas unidades de saneamento básico é o envelhecimento gradual dos sistemas de abastecimento o que reflete na evolução do consumo de energia, tanto nos seus componentes de infraestrutura civil quanto nos seus equipamentos eletromecânicos. A escassez hídrica também gera um impacto negativo no consumo de energia. Uma redução na quantidade de água disponível requer a busca de fontes de água mais distantes ou mais profundas, aumentando o consumo energético. Uma degradação na qualidade da água requer um tratamento mais intenso, o que requer mais energia e, conseqüentemente, mais oneroso (BRASIL, 2019).

O envelhecimento das estações de tratamento reflete também na manutenção dos ativos que acaba por ficar mais onerosa, demorada e trazendo prejuízos ao sistema de produção em termos de aumento das paradas inesperadas e problemas na qualidade de produção, podendo afetar a imagem da empresa (KARDEC; NASCIF, 2019).

Existe uma grande dificuldade dos gestores de manutenção em definir as principais ferramentas que serão utilizadas para

fazer a avaliação de desempenho em geral, seja os relacionados à desempenho de manutenção ou de máquinas e sistemas industriais. A seleção dos índices é essencial para o gestor em termos de melhorias e visão da empresa (BRANCO FILHO, 2016).

Uma forma de avaliar a eficiência energética e de produção das unidades de uma empresa de saneamento é com o uso de índices e indicadores que reflitam os parâmetros de energia elétrica e sistema de produção. Com isto, ainda é possível fazer uma relação entre sistemas de abastecimento que estão envelhecidos com sistemas novos, servindo de ferramenta para o corpo gestivo da empresa poder tomar decisões melhores sobre as condições dos seus ativos de produção e manufatura (CHAVES, 2020).

Sendo assim, este artigo pretende implantar e analisar índices relacionados ao consumo específico de energia: i) consumo específico efetivamente consumido de energia (CEC) e do ii) consumo específico normalizado (CEN) em uma empresa de saneamento e em unidades com equipamentos envelhecidos e outras unidades com equipamentos novos. Será realizado uma comparação entre os valores como forma de apoiar principalmente a gestão da manutenção industrial, podendo estabelecer um direcionamento sobre a situação dos ativos das plantas analisadas.

A importância e justificativa deste trabalho é, além do cálculo dos índices que irão favorecer decisões, em termos de ativos, para os gestores, também para as verificações de manutenção, que são afetadas pelos índices de eficiência energética. O controle da manutenção tem intuito de evitar desperdícios, retrabalhos, bom desempenho dos equipamentos e, de forma geral, o custo em manutenção, mantendo um nível de excelência mundial. Assim será possível para a gestão da manutenção estabelecer critérios de ação, definir estratégias e comparar metas.

## 1.1 Índices de eficiência energética

Ferramentas essenciais de avaliação de desempenho de sistemas e equipamentos industriais são os índices e indicadores, que possuem particularidades individuais. Os índices e indicadores ainda podem ser subdivididos de maneira específica, com base em sua representação. São classificados como índices e indicadores de: capacitação da manutenção; desempenho de máquina; desempenho de mão de obra; gerência de materiais (BRANCO FILHO, 2016).

Dentre os índices e indicadores relacionados com a eficiência energética, destacam-se aqueles que relacionam o consumo ou custo de energia elétrica para produzir certa quantidade de produto. Em termos de saneamento, o produto básico é o tratamento de água. Sendo assim, como forma de mensurar a quantidade de produção, o parâmetro utilizado é a vazão, em termos instantâneos, e o volume, em termos totais. Para verificar a quantidade de água tratada produzida e o consumo e custo de energia elétrica é utilizado o indicador de consumo específico de energia (CHAVES, 2020).

Para uma análise focada nos valores efetivamente produzidos, o volume total produzido deve considerar perdas do sistema produtivo. Sendo assim, pode-se calcular o índice para se estabelecer o consumo de energia elétrica e o volume real consumido de água tratada. O volume real consumido é a diferença entre o volume total disponível ao início do processo e as perdas do sistema. Assim, define-se o índice de consumo específico efetivamente consumido de energia (CEC), dado pela Eq. 1, a seguir (CHAVES, 2020).

$$CEC = \frac{\text{Consumo de energia elétrica}}{\text{Volume total Consumido}} \quad (1)$$



Na Eq. 1, o consumo de energia elétrica é dado em kWh e o volume total consumido, em m<sup>3</sup>.

Por fim, com intuito de comparar unidades e estações de bombeamento diferentes, é necessário considerar os equipamentos instalados e a necessidade de pressão introduzida no sistema de elevação de água. Utiliza-se a altura manométrica do sistema de bombeamento como referência para indicador de eficiência energética de instalações elevatórias, chamado de consumo específico normalizado (CEN), na Eq. 2 (CHAVES, 2020).

$$CEN = \frac{\text{Consumo de energia elétrica}}{\text{Volume total Consumido} \cdot \frac{H}{100}} \quad (2)$$

Em que:

O consumo de energia elétrica é dado em kWh;

O volume total consumido é dado em m<sup>3</sup>;

H é a altura manométrica do sistema, dada em m.

Alternativamente, para análise de custo, pode ser substituído o valor de consumo (kWh) pelo custo de energia (R\$), com objetivo de fazer a análise financeira com o índice, incluindo fatores relacionados à tarifa, como multas por fator de potência. Para avaliação de eficiência energética das unidades elevatórias, valores de CEN maiores que 0,54 kWh/m<sup>4</sup> mostram um desempenho insatisfatório, e entre (0,27 e 0,40) kWh/m<sup>4</sup> mostram um bom desempenho. A máxima eficiência teórica para estações de bombeamento é de 0,27 kWh/m<sup>4</sup>, sendo que para valores menores seria necessário sistemas que não consumam energia elétrica ou que possuam geração própria (CHAVES, 2020).

## 2. METODOLOGIA

A empresa de saneamento analisada é a Saneamento de Goiás S/A - SANEAGO, que é localizada em Goiás e é uma sociedade de economia mista. A empresa produz água tratada e a análise foi feita nos equipamentos relacionados ao sistema de tratamento e bombeamento de água. A empresa está desenvolvendo seu sistema de gestão, e melhorias são necessárias. Uma questão básica para a gestão é medir algo. Sendo assim, para que uma gestão eficiente seja implantada é necessário ter dados e informações medidas e registradas.

O setor da empresa que será alvo de estudo é o Sistema João Leite, delimitado no setor de manutenção deste sistema, responsável principalmente pela região leste de Goiânia-GO. Em termos de organograma local, este setor é ligado diretamente à produção da empresa. O produto básico da empresa é água tratada e tratamento de esgoto. Neste caso, o setor atua na produção de água tratada para consumo da sociedade. Esta parte da empresa ligada a produção é subdividida em dois setores básicos: operação e manutenção. Cada um com sua gerência e supervisões.

Para o cálculo dos indicadores, é necessário a coleta de dados que não estão disponíveis no setor de manutenção da empresa. Sendo assim, deve-se ter a integração do setor de manutenção com outros setores com objetivo de coletar os dados para o cálculo de todos os indicadores selecionados.

Sendo assim, os dados foram coletados no setor de: i) produção, volume total de água tratada produzida e consumida (mensal) e ii) energia: dados de consumo e tarifa de energia elétrica (mensal).

Os dados foram obtidos através de tarifas de energia disponíveis das unidades de estudo e dados nominais dos equipamentos e sistemas: i) valor de altura manométrica dos sistemas de

bombeamento; potência dos motores elétricos do sistema; idade média dos equipamentos e sistemas existentes nas unidades. Os dados para realização do trabalho foram coletados entre o período de março de 2021 até junho de 2021.

Os dados coletados foram de algumas unidades da empresa, todas na região metropolitana de Goiânia – GO e diferenciadas entre “envelhecida” que são unidades que possuem equipamentos e estruturas com 15 anos ou mais de vida total ou em “novas” com equipamentos com 5 anos ou menos de vida total: i) Estação elevatória da Barragem do Ribeirão João Leite, responsável pelo armazenamento de água bruta (EEAB-MB) – unidade nova; ii) Estação de Tratamento de Água Mauro Borges (ETA-MB) – unidade nova; iii) Estação Elevatória Frei Galvão (EAT-Frei Galvão) – unidade nova; iv) Estação Elevatória Água Bruta ETAG (EAB-ETAG) – unidade envelhecida; v) Estação de Tratamento de Água João Leite (ETA-ETAG) – unidade envelhecida v) Estação de Elevatória de Água Tratada João Leite (elevatória ETAG) – unidade envelhecida. A Fig. 1 Mostra a casa de máquinas da unidade nova: EEAB-MB.

Figura 1 - Casa de máquinas responsável pelo bombeamento de água bruta



Fonte: o autor.

A Tab. 1 mostra as unidades foco do estudo e a idade média considerando os principais equipamentos e estruturas.

Tabela 1 - Idade média das unidades

Unidade	Idade média
EEAB – MB	5 anos
ETA – MB	5 anos
EAT Frei Galvão	3 anos
EAB – ETAG	35 anos
ETA – ETAG	32 anos
Elevatória - ETAG	32 anos

Fonte: o autor.

Para as unidades ETA's, foi calculado o índice CEC. Para as unidades EAB's e a unidade EAT, foi calculado o índice CEN, que ilustra melhor a eficiência para cada tipo de unidade.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Realizada a coleta e a tratativa de dados é possível calcular os índices que servirão como base para tomada de decisões e definições sobre os ativos das unidades de estudo.

Para as unidades de tratamento (ETA's), foi calculado o índice de CEC, e para as unidades elevatórias, o índice CEN. Os valores calculados são mostrados na Tab. 2.

Tabela 2 - Índices de eficiência calculados para as unidades selecionadas

Mês	CEC ETAG-Antiga (kWh/m <sup>3</sup> )	CEC ETA-MB-Nova (kWh/m <sup>3</sup> )	CEN EEAB-MB-Nova (kWh/m <sup>4</sup> )	CEN EEAB-JL-Antiga (kWh/m <sup>4</sup> )	CEN Elevação ETAG-Antiga (kWh/m <sup>4</sup> )	CEN Elevação EAT FG-Nova (kWh/m <sup>4</sup> )
mar/21	0,0266	0,02	0,19	0,54	0,48	0,35
abr/21	0,0298	0,0193	0,21	0,57	0,52	0,37
mai/21	0,0367	0,0165	0,23	0,57	0,53	0,4
jun/21	0,0288	0,0191	0,2	0,52	0,55	0,36

Fonte: o autor.

A Tab. 2 mostra que os valores de CEC para a unidade nova foram sempre inferiores aos valores da unidade envelhecida. O mesmo acontece com o índice CEN para as unidades EEAB e elevatórias. Para todas as unidades novas, o valor do CEN está na faixa de boa eficiência energética. Já para as unidades antigas, em alguns meses o valor do CEN foi de eficiência insatisfatória. A Tab. 3 faz o cálculo similar ao da Tab. 2 contudo, ao invés de utilizar o consumo (kWh) foi utilizado o valor pago com energia elétrica (R\$).

Tabela 3 - Índices de custo calculados para as unidades selecionadas

Mês	CEC ETAG-Antiga (R\$/m <sup>3</sup> )	CEC ETA-MB-Nova (R\$/m <sup>3</sup> )	CEN EEAB-MB-Nova (R\$/m <sup>4</sup> )	CEN EEAB-JL-Antiga (R\$/m <sup>4</sup> )	CEN Elevação ETAG-Antiga (R\$/m <sup>4</sup> )	CEN Elevação EAT FG-Nova (R\$/m <sup>4</sup> )
mar/21	0,019	0,014	0,1	0,7	0,33	0,24
abr/21	0,022	0,014	0,11	0,79	0,37	0,27
mai/21	0,023	0,011	0,12	0,71	0,34	0,25
jun/21	0,019	0,012	0,1	0,75	0,36	0,24

Fonte: o autor.

Pela Tab. 3, destaca-se o alto valor do CEN para a EEAB-JL-Antiga, que apresentou um alto valor para o índice. Isto reflete um alto custo de energia elétrica em relação à quantidade de produto bombeado, o que remete à um estudo mais aprofundado da unidade, com verificação das tarifas.

Em todos os meses as unidades antigas apresentaram maiores valores de CEN, mostrando uma menor eficiência energética, inclusive com valores maiores do que 0,54 kWh/m<sup>4</sup> nos meses de abril e maio de 2021, o que indica uma eficiência insatisfatória para a unidade. Em todos os meses a unidade antiga apresentou maiores valores de CEN, sendo que no mês de junho de 2021 ocorreu um valor de eficiência insatisfatória para o CEN.

Tabela 4 - Relação entre os índices de eficiência das unidades

Mês	Relação antigo/novo EEAB's	Relação antigo/novo elevatórias	Relação antigo/novo ETA's
mar/21	2,87	1,38	1,33
abr/21	2,76	1,40	1,55
mai/21	2,48	1,33	2,23
jun/21	2,59	1,52	1,51

Fonte: o autor.

É possível observar, pela Tab. 4 que a relação entre os índices gera coeficientes maiores do que 1, conforme esperado, em todas as comparações e meses analisados. Para a relação entre as EEAB's, o valor da relação chegou a 2,87. As unidades envelhecidas possuem muitos equipamentos e sistemas envelhecidos e muitas vezes atuando com baixa eficiência geral o que é refletido nos valores dos índices de eficiência energética. A baixa eficiência das unidades antigas somado ao alto valor das contas de energia elétrica indicam um estudo específico de renovação das unidades envelhecidas, principalmente da unidade EEAB-JL, que apresentou altos valores de custo por quantidade produzida.

#### 4. CONCLUSÕES

Com este trabalho, foi possível implementar e analisar índices relacionados à eficiência energética de unidades novas e envelhecidas fazendo a relação entre os índices calculados. As unidades elevatórias e EEAB's novas apresentaram valores de CEN de boa eficiência energética, principalmente devido a tecnologias que visam a otimização da eficiência do sistema, como uso de inversores e modulação automática do bombeamento.

A unidade EEAB-MB nova apresentou valores de eficiência abaixo do mínimo em todos os meses analisados e isto foi principalmente pelo uso de geração de energia própria, com o uso de turbina geradora de energia elétrica e de bombeamento.

As unidades envelhecidas apresentaram alto valor dos índices de CEN o que é devido à equipamentos e sistemas de baixa eficiência. A unidade EEAB-JL apresentou um alto valor no índice de custo, o que remete a necessidade de um estudo mais aprofundado desta unidade para verificar a causa do alto custo. A política de manutenção destes ativos envelhecidos também é um fator que afeta o valor do CEN, principalmente em unidades antigas, e um melhor controle da manutenção, como utilização de manutenção preditiva e verificação de sistemas elétricos, incluindo os bancos de capacitores, pode ajudar a diminuir o valor do CEN.

Para as unidades ETA's, a diferença entre os valores de CEC no período de análise mostrou que a unidade nova possui uma melhor eficiência, mas a diferença foi a menor entre as outras unidades novas e envelhecidas comparadas. Este fato é principalmente pela ETA envelhecida, ETAG, possuir alguns sistemas hidráulicos de acionamento e que aproveitam a própria pressão das tubulações de distribuição do sistema de água tratada, o que diminui o consumo de energia elétrica. Já no caso da unidade ETA nova, ETA-MB, todos os acionamentos são por atuadores elétricos. Ainda assim, a eficiência energética da unidade nova é melhor do que a da ETA envelhecida.

Com o estudo dos indicadores de eficiência em estações relacionadas ao saneamento foi possível estabelecer fundamentos que, juntamente com outros indicadores e ferramentas de análise, podem dar suporte para as decisões em termos da gestão de ativos e de processos da empresa.

Por fim, para uma melhor compreensão dos indicadores, sugere-se o estudo aprofundado da eficiência das unidades, como o cálculo por equipamento individual do indicador de CEN. Sugere-se ainda uma relação adicional que envolva não só as comparações dos indicadores de eficiência, mas também com

fatores de custos relacionados a cada unidade. Este estudo de custo pode envolver fatores somente de eficiência energética ou ainda conter fatores específicos, como gasto de manutenção e operação dos equipamentos e sistemas. Pode-se ainda realizar um *benchmarking* externo com intuito de comparar unidades de diferentes empresas de saneamento, o que pode ajudar a definir metas mais ambiciosas.

## REFERÊNCIAS

BRANCO FILHO, Gil. **Indicadores e Índices de Manutenção**. 2. ed. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna Ltda., 2016.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS). **24º Diagnóstico dos serviços de água e esgoto**. Brasília: MDR, 2019. Disponível em: <http://www.snis.gov.br/>. Acesso em: dez. 2021

CHAVES, Roberto Cesar Pessoa. **Eficiência energética no saneamento: Estudo de caso da Estação Elevatória de Água Bruta de Joviânia**. 2020. Trabalho de conclusão de curso (Especialização) – Instituto de Pós-Graduação e Graduação, Goiânia, 2020.

KARDEC, Alan; NASCIF, Júlio. **Manutenção: Função Estratégica**. 5. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark Editora, 2019.



# AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO ESCOAMENTO EM TÚNEL DE VENTO

Maycon Marques<sup>1</sup> (maycon.marques@discente.ufg.br)

Júlia Purificação<sup>1</sup> (julia.purificacao@discente.ufg.br)

Andreia Nascimento<sup>1</sup> (aanascimento@ufg.br)

Diogo Colvero<sup>1</sup> (diogocolvero@ufg.br)

<sup>1</sup>Universidade Federal de Goiás - Goiânia

**Resumo:** O estudo do comportamento de um escoamento é aplicado em diversas áreas como: construção civil, aeronáutica, mudanças climáticas, automobilística, meteorologia, entre outras. Para que sua aplicação seja feita de forma eficiente e precisa, o uso de equipamentos de confiança é crucial. Entre esses equipamentos, um que se destaca é o túnel de vento, que, quando usado com ferramentas auxiliares de medição (anemômetro e tubo de Pitot, por exemplo) se torna uma importante ferramenta no estudo de escoamento. Tendo em vista sua relevância, este trabalho se propôs a analisar como se comporta o escoamento de ar dentro de um túnel de vento de circuito aberto, além de apresentar seus principais equipamentos auxiliares de medição (anemômetro e tubo de Pitot). Além disso, verificou-se como a metodologia utilizada por Varshney e Poddar (2011) pode ser aplicada nesse túnel de vento para futuras medições. Os resultados apontaram que a superfície da seção de testes interfere bastante no escoamento e que a escolha do instrumento de medição pode vir a influenciar nos resultados e até torná-los inoperantes quando não usados nas condições corretas.

**Palavras-chave:** túnel de vento; anemômetro de fio quente; tubo de Pitot.

## 1. INTRODUÇÃO

A teoria da camada limite é uma importante ferramenta usada para análise de escoamento, sendo desenvolvida por Ludwig Prandtl em 1904 (WHITE, 2011). Diversos estudos foram realizados ao longo dos anos, tendo como base essa teoria, destacando-se os estudos nas áreas de meteorologia, como o da variação da camada limite atmosférica na China nos últimos 40 anos, e como isso influencia o clima (GUO *et al.*, 2019). As pesquisas na área de potencial energético também são bastante frequentes, como os estudos de potencial eólico (CARDOSO, 2020).

Dada a importância do túnel de vento para estudos aerodinâmicos (SZWABA *et al.*, 2021) e sua limitação para obter dados numéricos isoladamente, utilizaram-se o tubo de Pitot e o anemômetro como equipamentos auxiliares, além da teoria de camada limite (desenvolvida por Ludwig Prandtl) para analisar o escoamento dentro do túnel. Tendo isso em vista, o objetivo deste trabalho foi compreender o comportamento do escoamento dentro de um túnel de vento subsônico de circuito aberto, apurar se o método de medição adotado, baseado na metodologia desenvolvida por Varshney e Poddar (2011), é eficaz para este tipo de túnel de vento e obter parâmetros com o intuito de definir as condições mais adequadas para realização de novos experimentos, como: posicionamento de objetos dentro da seção de testes e qual equipamento auxiliar utilizar.

### 1.1 Bibliografia

A teoria da camada limite, desenvolvida e apresentada em um artigo em 1904, concretizou Ludwig Prandtl como “pai da mecânica dos fluidos moderna”, sendo considerado o artigo mais importante relacionado ao estudo da mecânica dos fluidos. Nes-

te trabalho, Prandtl apresentou a teoria da camada limite, a qual consagrou uma divisão em duas camadas no escoamento de fluidos com baixa viscosidade, sendo uma delas a camada limite, próxima às áreas de contato e superfícies sólidas, e uma camada externa, onde as equações de Euler e Bernoulli podem ser aplicadas, considerando a camada sem viscosidade (WHITE, 2011).

F. H. Wenham criou o primeiro modelo túnel de vento que se tem registro, com o objetivo de analisar os protótipos de aeromodelos desenvolvidos pelo próprio (GORECKI, 1988). Já na década de 60, Jensen e Frank provaram ser viável a análise do vento em escala laboratorial ao utilizar o túnel de vento, sendo possível modelar o perfil de velocidade e estimando, de forma confiável, a pressão e a força produzida por escoamentos sobre objetos (MATTUELLA, 2012).

O túnel de vento está bem estabelecido no mercado, além de ter o conhecimento de seu funcionamento básico bastante difundido (MERRISON, 2011). Porém, isoladamente, este equipamento não fornece informações numéricas relevantes. Sendo assim, faz-se necessária a utilização de equipamentos que complementem seu uso. Entre os principais equipamentos complementares ao túnel de vento, estão: o anemômetro de fio quente e o tubo de Pitot.

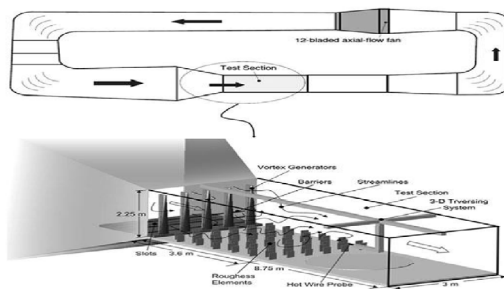
Com quase três séculos de existência, o tubo de Pitot, criado por Henri Pitot, é um dos equipamentos mais implementados em estudos relacionados a velocidade e vazão de um fluido (D'AMATO *et al.*, 2020). Outro equipamento muito usado é o anemômetro de fio quente, que possui algumas vantagens em relação a outros meios de medição (EGUTI; VIEIRA, 2004), tais como: operar em uma extensa faixa de velocidades (LUNDSTRÖM *et al.*, 2007), a rápida resposta de medição e pós-processamento de dados (PROENÇA *et al.*, 2019), e uma alta resolução espacial e temporal do campo de velocidades (SUN *et al.*, 2019).

Com o conjunto túnel de vento e seus equipamentos auxiliares (anemômetro de fio quente e tubo de Pitot), diversos dados podem ser obtidos, como: velocidade, pressão, vazão de um escoamento, e até mesmo obter a camada limite de uma superfície. Tais informações são cruciais em diversas áreas, tornando o uso deste conjunto de grande ajuda em estudos de: aeronáutica, potencial eólico, meteorologia, mudanças climáticas, entre outros.

## 2. METODOLOGIA

Este trabalho foi realizado em duas etapas: consulta bibliográfica referente ao túnel de vento e seus principais equipamentos auxiliares (tubo de Pitot e anemômetro de fio quente), e a realização de experimentos, seguindo uma metodologia já usada no meio científico. Os ensaios realizados foram baseados na metodologia adotada por Varshney e Poddar (2011), cujo intuito foi verificar a possibilidade de simulação da camada limite atmosférica (CLA) em um túnel de vento. O experimento proposto por Varshney e Poddar (2011) consistiu em medir a velocidade do fluxo perturbado por dispositivos a montante ao longo da região de teste do túnel de vento (Fig. 1).

Figura 1 - Esquema experimental de Varshey e Poddar



Fonte: VARSHEY; PODDAR (2011).

O resultado dessa pesquisa foi a correlação entre a turbulência no túnel de vento e o ambiente real. A partir dessa relação, tornou-se possível simular a CLA dentro de um túnel de vento, independentemente do número de *Reynolds*.

No presente estudo, foram usados: um túnel de vento de circuito aberto subsônico da AeroAlcool, operando entre 0,0 m/s e 35 m/s (Fig. 2) e tubos de Pitot, sendo dois para realizar as medições e um para controle do túnel de vento e referência para as medições.

Em consequência à ausência de um equipamento que pudesse varrer toda seção de teste horizontalmente, como o usado por Varshney e Poddar (2011), foram selecionados dois pontos para realizar as medições: o primeiro ponto próximo ao meio da sessão de teste, onde se inicia as medições do trabalho usado como base para os experimentos, e o segundo ponto próximo ao final da sessão de testes, como ilustrado na Fig. 3. Foi usado ainda um terceiro tubo de Pitot, que serviu como controlador de velocidade do túnel de vento e de referência para as medições.

Figura 2 - Túnel de vento circuito aberto AeroAlcool

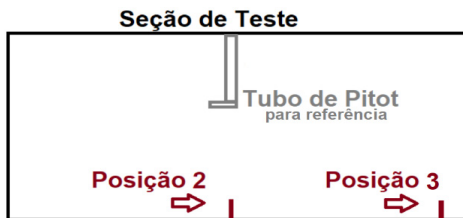


Fonte: o autor.

Além disso, as medições foram realizadas em alturas diferentes, entre 0,5 cm de altura e 25,5 cm, variando 0,5 cm a cada medição. Essa escolha foi feita, pois variações menores que 0,5 cm

apresentaram mudanças de pouca significância e a altura de 25,5 cm é o comprimento máximo do tubo de Pitot.

Figura 3 - Posição de equipamentos



Fonte: o autor.

Com intuito de obter informações do túnel de vento em situações variadas, os ensaios foram realizados em velocidades diferentes, sendo elas: 10 m/s, 20 m/s e 30 m/s, cobrindo toda a faixa de velocidades do túnel de vento disponível para a pesquisa.

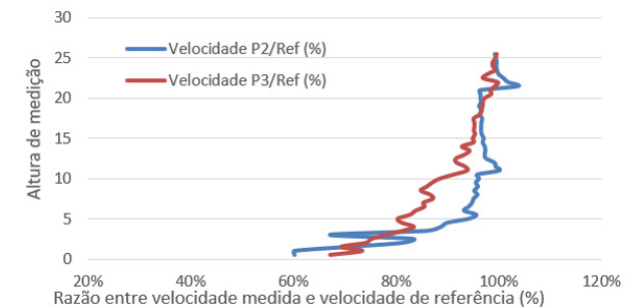
Com os dados obtidos, foi traçado as curvas de velocidades dentro do túnel de vento tendo como base a razão entre as velocidades medidas e a velocidade de referência, e a altura na qual foram realizadas as medições.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como resultado, estes métodos permitiram analisar a semelhança no comportamento do escoamento quando comparado ao trabalho usado como base para os ensaios, não necessariamente tendo que ser igual e descartando a análise da turbulência gerada, pois, diferente da referência, este trabalho não se propôs a simular a CLA.

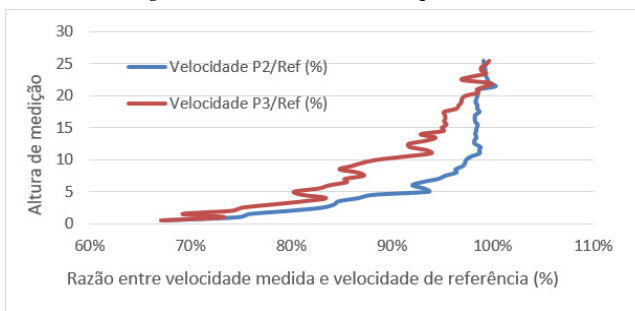
A análise do comportamento do escoamento para velocidades de 10 m/s, 20m/s e 30m/s pode ser vista nas Figs. 4 ,5 e 6, respectivamente, onde P2, P3 e Ref, se referem as velocidades medidas no ponto 2, 3 e no tubo de Pitot de referência, respectivamente, como já ilustrado na Fig 3.

Figura 4 - Curva de velocidade para 10m/s



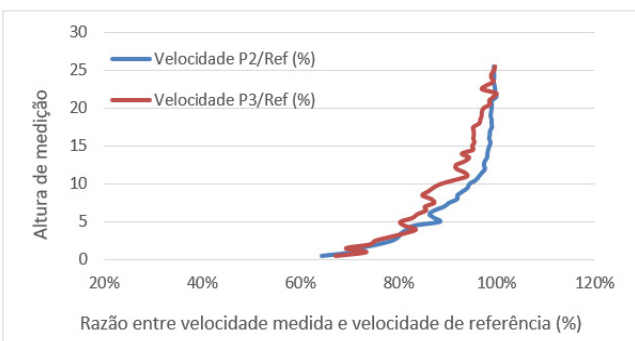
Fonte: o autor.

Figura 5 - Curva de velocidade para 20m/s



Fonte: o autor.

Figura 6 - Curva de velocidade para 30m/s



Fonte: o autor.

Analisando as curvas, é possível ver uma semelhança entre elas, na qual a velocidade medida se aproxima da velocidade de referência conforme a altura da medição aumenta, tal comportamento é visto no trabalho de Varshney e Poddar (2011), o que corrobora com os resultados obtidos.

Foi observado também, que a curva de velocidades apresenta um comportamento mais linear conforme aumenta a distância da entrada da seção de testes, isso ocorre em todas as velocidades testadas. Tal comportamento foi visto em outros trabalhos, como o de Chamorro e Porté-Agel (2009), cujo intuito do trabalho era estudar o efeito da camada limite em diferentes pontos em turbinas eólicas.

Outro fato visto foi a instabilidade apresentada em medições realizadas até a altura de 3,5 cm para velocidade de 10 m/s no ponto 2. Este padrão não foi visto nas referências, provavelmente pela diferença de dimensão dos túneis de vento analisados, sendo, o usado por Varshney e Poddar (2011), 2,25 m de altura e, o usado neste trabalho, 0,46 m. Uma das hipóteses para este comportamento é de uma limitação inerente do equipamento de medição, que pode apresentar instabilidades nas medições quando aplicado em condições de baixas velocidades.

#### 4. CONCLUSÕES

Baseando-se na análise dos resultados obtidos e os apresentados nas referências, é possível afirmar que a metodologia aplicada no trabalho de Varshney e Poddar (2011) foi devidamente aplicada neste trabalho e poderá ser aplicada em trabalhos futuros no túnel de vento usado, para realizar análises futuras de escoamento.

Além disso, as curvas de altura/velocidade mostraram como a velocidade varia dentro da seção de testes, sendo que uma das



causas dessa variação é a interferência das superfícies do túnel de vento no escoamento. Sabendo disso, afirma-se que o posicionamento do corpo a ser submetido ao escoamento é de extrema importância para obter dados precisos.

Por fim, pode-se observar que as limitações inerentes aos equipamentos auxiliares de medição (anemômetro de fio quente e tubo de Pitot) devem ser considerados quando se for realizar ensaios, pois os dados obtidos por eles podem variar quando não aplicados em condições ideais, ou até mesmo se tornarem inoperantes.

## 5. AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Furnas Centrais Elétricas S/A (FURNAS), Universidade Federal de Goiás e a Pró-reitoria de Pesquisa e Inovação (PRPI) pelo apoio à nossa pesquisa.

## REFERÊNCIAS

- AEROALCOOL. **AA-TVSH50**: Túnel de Vento de circuito aberto, 2021. Disponível em: <http://aeroalcool.com.br/index.php/tuneis-de-vento/25-gallery/tuneis-de-vento/30-aatvsh50>. Acesso em: 30 nov. 2022.
- ABUBARKER, Ahmed; KOSTIC, Ivan; KOSTIC, Oliveira; STEFANOVIC, Zoran. **Modelagem CFD de simulações de camada limite atmosférica em túneis de vento**. Osijek, 2018.
- BARLOW, J. B.; RAE, W. H.; POPE, A. **Low-speed wind tunnel testing**. 3. ed. New York: John Wiley & Sons Inc., 1999.
- CALOTESCU, I.; TORRE, S.; FREDA, A.; SOLARI, G. Wind tunnel testing of telecommunication lattice towers equipped. **Engineering Structures**, v. 241, ago. 2021.
- CARDOSO, F. M. R. **Caracterização experimental de túneis de vento para análise de potencial eólico**. 2020. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental e Sanitária) - Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2020.
- CHAMORRO, Leonardo; PORTE-AGEL, Fernando. Efeitos da estabilidade térmica e características de fluxo da camada limite de entrada em

esteiras de turbinas eólicas: um estudo de túnel de vento. **Boundary-Layer Meteorology**, 2010.

CHAMORRO, L.; PORTE-AGEL, F. A Wind-Tunnel Investigation of Wind-Turbine Wakes: Boundary-Layer Turbulence Effects. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 132, 2009.

D'AMATO, F. *et al.* Spectroscopic techniques versus pitot tube for the measurement of flow velocity in narrow ducts. **Sensors**, Switzerland, v. 20, n. 24, p. 1-19, 2 dez. 2020.

EGUTI, C. C. A.; VIEIRA, E. Del R. Development of basic circuit of a hot-wire anemometer. *In*: BRAZILIAN CONGRESS OF THERMAL SCIENCES AND ENGINEERING, 10., 2004, Rio de Janeiro. **Proceedings [...]**, Rio de Janeiro, 2004.

GORECKI, J. P. Túneis aerodinâmicos: passado, presente e futuro. *In*: ENCONTRO NACIONAL DE CIÊNCIAS TÉRMICAS, 2., 1988, Águas de Lindóia. **Anais [...]**, Águas de Lindóia, SP, 1988. 53 p.

GUO, J.; LI, Y.; COHEN, J. B.; LI, J.; CHEN, D.; XU, H.; LIU, L.; YIN, J.; HU, K.; ZHAI, P. Shift in the Temporal Trend of Boundary Layer Height in China Using Long-Term (1979–2016), Radiosonde Data. **Geophysical Research Letters**, v. 46, n. 11, jun. 2019.

JÄCKEL, R.; GUTIÉRREZ-URUETA, G.; TAPIA, F. A review on Pitot tube icing in aeronautics: Research – design and characterization – future trends. **Flow Measurement and Instrumentation**, v. 81, 1 out. 2021.

LUNDSTRÖM, H.; SANDBERG, M.; MOSFEGH, B. Temperature dependence of convective heat transfer from fine wires in air: A comprehensive experimental investigation with application to temperature compensation in hot-wire anemometry. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 32, n. 2, nov. 2007.

MATTUELLA, J. M. L. **Avaliação em túnel de vento do comportamento da camada ímite atmosférica em terrenos complexos**. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

MERRISON, J. Environmental Wind Tunnels. *In*: OKAMOTO, S. **Wind Tunnels**. London: IntechOpen, 2011.

PROENÇA, A.; LAWRENCE, J.; SELF, R. Measurements of the single-point and joint turbulence statistics of high subsonic jets using hot-wire anemometry. **Experiments in Fluids**, v. 60, n. 4, apr. 2019.

SANTOS, A. R.; SILVA, B. W.; NETO, F. S.; LOPES, L. D.; DIONÍSIO, T. H. **Elaboração de túnel de vento para aplicações de ensaios aerodinâmicos**. 2014. 39 f. Trabalho de conclusão de curso (Técnico em mecânica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, São José dos Campos, São Paulo, 2014.

SUN, L. *et al.* Experimental study of gas swirling flow instability characteristics in a cyclone using the hot-wire anemometry. **AiChE Journal**, v. 66, n. 1, ago. 2019.

SUN, X.; ARJUN, K.; WU, Y. Investigation on wind tunnel experiment of oval-shaped archsupported. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 206, nov. 2020.

SUDEESH, K.; STATHOPOULOS, T.; SURESH KUMAR, K. Wind loads on rainscreen walls: Boundary-layer wind tunnel experiments. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 96, n. 6-7, jun.-jul. 2008.

SZWABA, R.; HINC, K.; OCHRYMIUK, T.; KRZEMIANOWSKI, Z.; DOERFFER, P.; KUROWSKI, M. Open low speed wind tunnel – design and testing. **Archives of Thermodynamics**, v. 42, n. 1, Polônia, 2021.

VARSHNEY, K.; KAMAL, P. Experimentos em controle de escala de comprimento integral de túnel de vento de camada limite atmosférica. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 106, 2011.

WALKER, G. R. Wind engineering beyond the boundary layer wind tunnel. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 41, n. 1-3, oct. 1992.

WEERASURIYA, A. U.; TSE, K.T. Simulation of twisted wind flows in a boundary layer wind tunnel for pedestrian-level wind tunnel tests. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Hong Kong, v. 159, 2016.

WHITE, F. M. **Mecânica dos fluidos**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2011.

# UTILIZAÇÃO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL PARA PREDIÇÃO DOS EFEITOS DE CARGAS DE VENTO SOBRE UMA VIGA ENGASTADA

Pedro Augusto Dias Rodrigues<sup>1</sup> (pedro\_rodrigues@discente.ufg.br)

Marlipe Garcia Fagundes Neto<sup>1</sup> (marlipe@ufg.br)

Sigeo Kitatani Junior<sup>1</sup> (sigeojr@ufg.br)

<sup>1</sup>Universidade Federal de Goiás

**Resumo:** A inteligência artificial tem ganhado cada vez mais destaque em aplicações operacionais e de instrumentação de sistemas dinâmicos para prevenção de falhas catastróficas. Este trabalho traz um breve histórico sobre a utilização da IA no monitoramento de sistemas dinâmicos. Neste trabalho é proposto o desenvolvimento de rede neural artificial para determinação dos efeitos das cargas de vento em uma viga engastada, treinando-a previamente com dados obtidos através das simulações obtidas no Ansys pelo método dos elementos finitos. O caso implementado foi o escoamento sobre uma chapa plana, com dimensões de 300 mm de altura por 100 mm de largura, com espessura de 2 mm. As velocidades foram variadas de 1 m/s a 25 m/s com espaçamento de 2,5 m/s, e foram observados os efeitos de Tensões, Deflexões, Deformações, Fator de Segurança Estático, e Fator de Segurança à Fadiga para diversos pontos ao longo da direção vertical da placa plana e a Força de Reação na Base da mesma. Foram estudados três tipos de algoritmos de treinamentos para a rede neural: Levenberg-Marquardt, Scaled Conjugate Gradient e Bayesian Regularization. Com base no fator de correlação da rede neural, obteve-se os melhores resultados para o método BR (Bayesian Regularization).

**Palavras-chave:** inteligência artificial; tensões; deformações; redes neurais.

## 1. INTRODUÇÃO

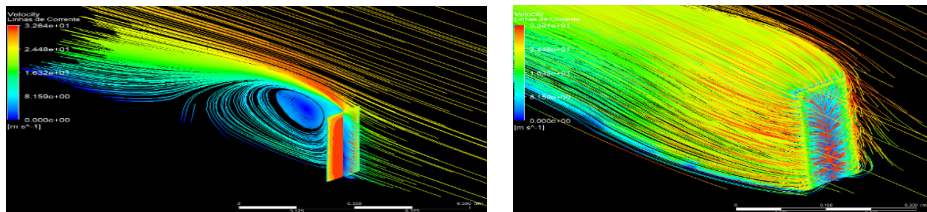
Inteligência artificial pode ser definida como sendo o ramo da ciência da computação que estuda como construir máquinas que executem tarefas de forma inteligente. O termo inteligência artificial surgiu em 1956, a partir de uma série de conferências na universidade de Dartmouth, nos Estados Unidos, em que o professor John McCarthy propôs que matemáticos e cientistas trabalhassem em um projeto para conseguir que uma máquina se comportasse de maneira que, um ser humano pudesse realizar suas tarefas de forma inteligente (McAVOY, 2002).

A proposta deste trabalho é a utilização dos conceitos de inteligência artificial e sensores virtuais para capturar os efeitos de cargas de vento sobre uma placa plana de dimensões definidas por meio de sensores de deformação instalados em pontos estratégicos. Para isso, aplica-se uma rede neural artificial treinada com os resultados das simulações realizadas no software de elementos finitos, Ansys®.

## 2. METODOLOGIA

O caso implementado foi o escoamento sobre uma chapa plana, com dimensões de 300 mm de altura por 100 mm de largura, com espessura de 2 mm, visando a representação em escala de um modelo de turbina eólica que pudesse ser medido em um túnel de vento, com resultados experimentais para comparação. As velocidades foram variadas de 1 m/s a 25 m/s, e foram observados os efeitos sobre a placa plana. A Fig. 1 ilustra o campo de velocidades, obtido via simulação pelo método dos elementos finitos, resultante do escoamento sobre a placa plana adotada:

Figura 1 - Campo de velocidades obtidos na Simulação



Fonte: o autor.

### a) Quantidade de entradas

Foram definidas duas entradas para o modelo adotado: velocidade do escoamento e altura em relação a base de fixação da placa plana. A velocidade foi avaliada de 1 m/s até 25 m/s, enquanto que a posição de medição vertical em relação à base foi detalhada em quantidade de subdivisões, a fim de ajustar o modelo mais eficiente para a aplicação. Foram feitas as seguintes subdivisões da altura da placa plana: 50, 40, 30, 20, 10, 5, e 3 divisões de altura.

### b) Quantidade de neurônios: camada oculta

A quantidade de neurônios na camada oculta é uma variável que pode ser definida de diversas formas. A mais comum é a definida pelo método de Fletcher – Gloss (SILVA *et al.*, 2010), dado pela Eq. 1:

$$2 * k^{\frac{1}{2}} + N_2 \leq N_1 \leq 2 * k + 1 \quad (1)$$

- k: Número de pontos de entradas de rede.
- N1: Número de neurônios na camada oculta.
- N2: Número de neurônios na camada de saída.

A Tab. 1 mostra os valores adotados para configurar a rede neural:

Tabela 1 - Valores adotados para quantidades de neurônios na camada oculta

REDE NEURAL	NUMERO DE NEURÔNIOS
Tensão	5 neurônios
Deflexão	5 neurônios
Deformação	6 neurônios
Fator de Segurança Estático	5 neurônios
Fator de Segurança a Fadiga	5 neurônios
Força de Reação na Base da Placa Plana	5 neurônios

Fonte: o autor.

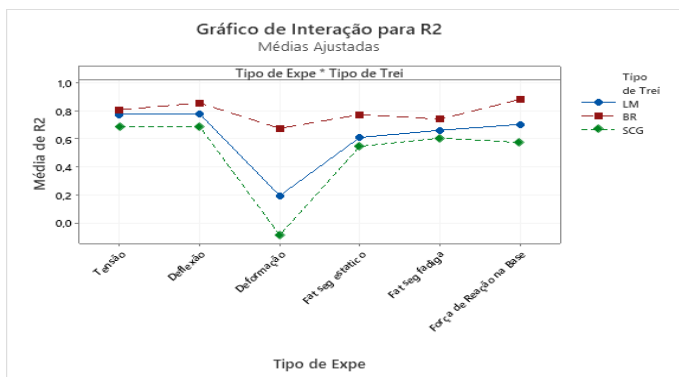
### c) Quantidades de saídas

As saídas admitidas para este estudo são: tensão, deflexão, deformação, fator de segurança estático, fator de segurança a fadiga e força de reação na base.

### d) Tipo de treinamento da rede neural

Foram estudados três tipos de algoritmos de treinamento para a rede neural: Levenberg-Marquardt, Scaled Conjugate Gradient e Bayesian Regularization. Com base no fator de correlação da rede neural, obteve-se os melhores resultados para o método Bayesian Regularization, como mostrado na Fig. 2:

Figura 2 - Gráfico de Interação para R2



Fonte: o autor.

### e) Descrição Topológica da Rede Neural

A rede neural artificial proposta foi estruturada no formato *Feedforward Multi-Layer Perceptron*, por sua simplicidade de implementação. O tipo de treinamento admitido foi o treinamento supervisionado. A topologia adotada para cada variável de interesse está resumida na Tab. 2:

Tabela 2 - Topologia da Rede Neural adotada

Arquitetura		<i>Multi-Layer Perceptron</i>
Tipo de treinamento		Supervisionado
Número máximo de camadas ocultas		1
Topologia	Tensão	2 – 5 – 1
	Deflexão	2 – 5 – 1
	Deformação	2 – 3 – 3 – 1
	Força de Reação na Base	2 – 5 – 1
	Fator de Segurança Estático	2 – 5 – 1
	Fator de Segurança a Fadiga	2 – 5 – 1
Algoritmo de treinamento		<i>Error back-propagation e Bayesian Regularization</i>
Função de ativação da camada oculta		Tangente Hiperbólica
Função de ativação da camada de saída		Função Linear

Fonte: o autor.

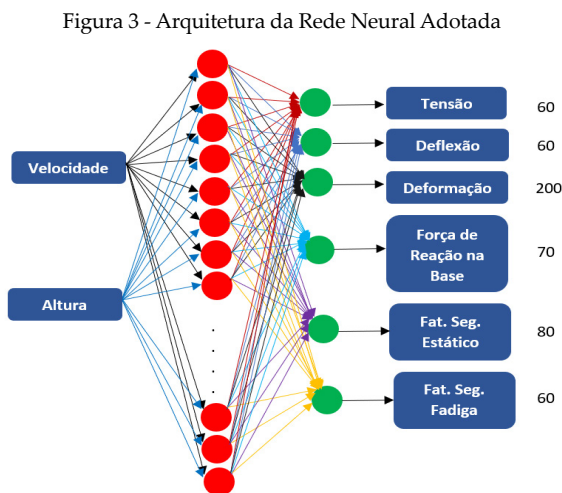
Foi utilizado o algoritmo de treinamento por retro propagação de erros ou *error back-propagation*, sendo este o algoritmo mais utilizado em arquiteturas *Multi-Layer Perceptron* (MLP). A otimização deste algoritmo de retro propagação de erros foi realizada por meio do algoritmo Bayesian Regularization. A função performance foi definida como o Erro Quadrático Médio (EQM), e realizou-se a inicialização dos pesos sinápticos em zero, logo as matrizes de pesos não devem convergir para um certo patamar em caso de múltiplos treinamentos. Observando-se os efeitos do



sobre ajuste (*overfitting*), foi selecionado o método de validação cruzada, ao impor a divisão dos pares de entradas e saída de treinamento nos subconjuntos de: 70% dos dados para treinamento, 15% para validação e 15% para teste.

#### f) Estrutura final da Rede Neural

A configuração final da Rede Neural adotada é mostrada na Fig. 3:



Fonte: o autor.

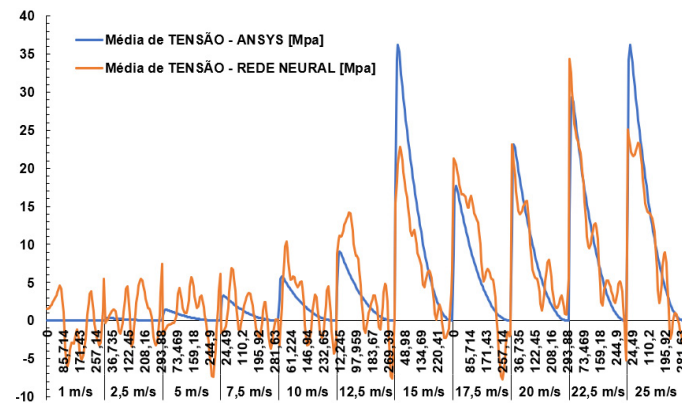
### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir serão mostrados os resultados obtidos através do treinamento da rede Neural sobre os pontos obtidos através da Simulação Numérica do modelo no Ansys.

#### a) Tensão

O resultado gráfico comparando os valores de tensão obtidos pelo método dos elementos finitos e os valores determinados pela rede neural proposta é mostrado na Fig. 4.

Figura 4 - Comparativo entre os valores de tensão

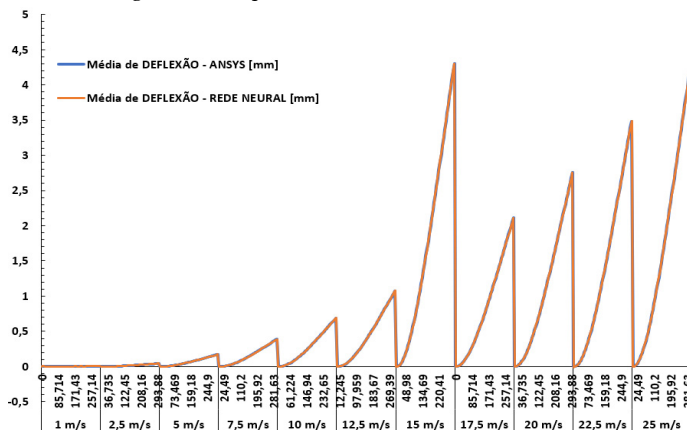


Fonte: o autor.

### b) Deflexão

O resultado gráfico comparando os valores de deflexão obtidos pelo método dos elementos finitos e os valores determinados pela rede neural proposta é mostrado na Fig. 5.

Figura 5 - Comparativo entre os valores de deflexão

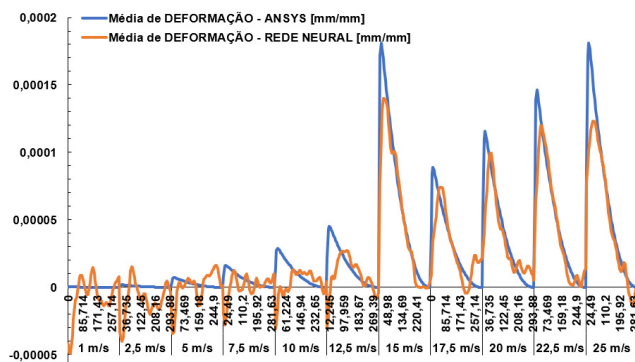


Fonte: o autor.

### c) Deformação

O resultado gráfico comparando os valores de deformação obtidos pelo método dos elementos finitos e os valores determinados pela rede neural proposta é mostrado na Fig. 6.

Figura 6 - Comparativo entre os valores de deformação

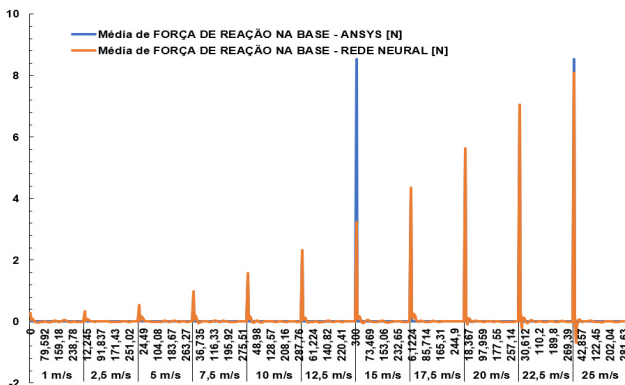


Fonte: o autor.

### d) Força de reação da base da placa plana

O resultado gráfico comparando os valores de força de reação na base obtidos pelo método dos elementos finitos e os valores determinados pela rede neural proposta é mostrado na Fig. 7:

Figura 7 - Comparativo entre a força de reação da base

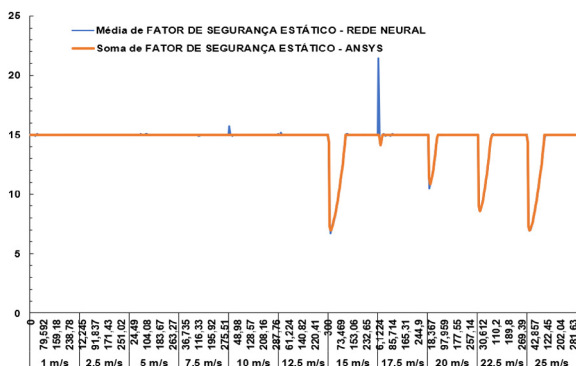


Fonte: o autor.

### e) Fator de segurança estático

O resultado gráfico comparando os valores de fator de segurança estático obtidos pelo método dos elementos finitos e os valores determinados pela rede neural proposta é mostrado na Fig. 8:

Figura 8 - Comparativo entre fatores de segurança estático

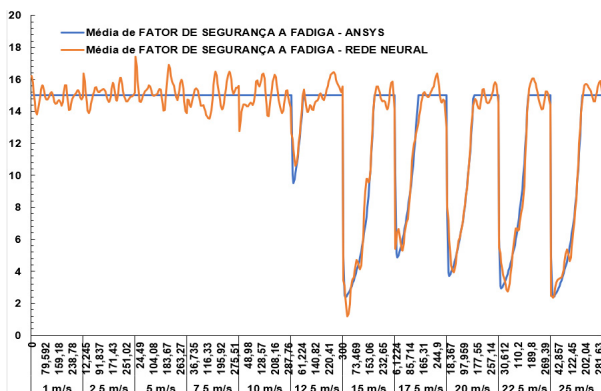


Fonte: o autor.

### f) Fator de segurança à fadiga

O resultado gráfico comparando os valores de fator de segurança à fadiga obtidos pelo método dos elementos finitos e os valores determinados pela rede neural proposta é mostrado na Fig. 9.

Figura 9 - Comparativo entre fatores de segurança a fadiga



Fonte: o autor.

## 4. CONCLUSÃO

Os dados obtidos mostram a capacidade de aprendizado da rede neural artificial a partir dos dados obtidos pelo método dos elementos finitos apresenta boa precisão, tornando a rede neural bastante robusta para determinar resultados obtidos por sensores reais em campo. Essa abordagem desenvolvida pode ser aplicada no monitoramento de torres eólicas ou mesmo estruturas sujeitas a cargas de vento para prever condições de esforços ou deformações críticas que possam trazer danos estruturais, e então antecipar possíveis problemas.

## 5. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer FURNAS Centrais Elétricas e o “Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico” (P&D) da ANEEL pelo suporte financeiro.

## REFERÊNCIAS

- SILVA, I. N.; SPATTI, D. H.; FLAUZINO, R. A. **Redes Neurais Artificiais**: Para Engenharia e Ciências Aplicadas. São Paulo: Artliber, 2010.
- McAVOY, T. Intelligent “control” applications in the process industries. **Annual Reviews in Control**, v. 26, n. 1, p.75-86, 2002.

# EFEITO DO TEMPO DE AUSTENITIZAÇÃO SOBRE DUREZA E SUSCEPTIBILIDADE À CORROSÃO INTERGRANULAR DO AÇO INOXIDÁVEL FERRÍTICO 410D

Renata Rodrigues Alves<sup>1</sup> (renata\_rodrigues@ufg.br)

Daniel Fernandes Cunha<sup>1</sup> (danielcunha@ufg.br)

Kléber Mendes de Figueiredo<sup>1</sup> (kleberfig@ufg.br)

Wilian da Silva Labiapari<sup>2</sup> (wilian.labiapari@aperam.com)

<sup>1</sup>Universidade Federal de Goiás

<sup>2</sup>Aperam South America

**Resumo:** O presente trabalho consistiu na investigação do efeito de diferentes tempos de austenitização no aço inoxidável ferrítico 410D (S41003) quando submetido a um tratamento térmico isotérmico, avaliando a microestrutura, dureza e resistência à corrosão da liga. Os testes experimentais foram realizados nos Laboratórios de Materiais e Processos de Fabricação (LAMAF), pertencentes à UFG - Campus Goiânia. O procedimento experimental consistiu em temperar o material variando o tempo de austenitização em 5 min e 240 min., com resfriamento em água. A sensitização do material, no estado de entrega e após temperado, foi avaliado pelo teste de corrosão realizado de acordo com a norma ASTM A763 - prática W. Observou-se que o aço no estado de entrega possui uma microestrutura tipicamente ferrítica e baixa susceptibilidade à corrosão intergranular. As amostras temperadas em água apresentaram uma estrutura bifásica, martensítica e ferrítica, e corrosão intergranular menos expressiva. Por outro lado, ocorreu uma queda na dureza da amostra mantida a temperatura de austenitização por mais tempo.

**Palavras-chave:** aço inoxidável; têmpera; microestrutura; dureza; corrosão.

## 1. INTRODUÇÃO

Teoricamente os aços inoxidáveis ferríticos não podem ser austenitizados e, portanto, não endurecem por tratamentos térmicos (MODENESI, 2001). Entretanto, estudos com o aço inoxidável ferrítico 410D indicam que a liga pode ser totalmente ou parcialmente endurecida por meio de tratamento térmico, devido ao baixo teor de cromo e outros elementos estabilizadores de ferrita (SUNDQVIST *et al.*, 2018). Quando endurecido parcialmente, o material forma uma estrutura bifásica, composta por ferrita e martensita. A martensita é uma fase mais dura e resistente, por outro lado, a ferrita é mais macia e frágil, gerando uma combinação de propriedades que podem ser favoráveis a depender da situação (NUNES, 2020).

Além da sua composição básica de Fe, C e Cr, outros elementos são adicionados ao 410D, visando interferir nas propriedades mecânicas e microestrutura do material. O níquel e o manganês são elementos que, quando adicionados em alta concentração, contêm papel de estabilizador da austenita (COSTA E SILVA; MEI, 2010). Por outro lado, o cromo, molibdênio e nióbio, traz o papel de estabilizar a ferrita, que diminuem a faixa onde a austenita existe (BONIARDI; CASAROLI, 2014). Os elementos que estabilizam a austenita, por exemplo, tendem a diminuir a temperatura de transformações da fase austenita  $\gamma$  para fase ferrita  $\alpha$  e aumentar a temperatura da austenita  $\gamma$  para a fase ferrita  $\sigma$ .

Faria *et al.* (2020) em seu trabalho com a liga 410D, contendo 0,013% e 11,097% em peso de carbono e cromo respectivamente, obteve diferentes microestruturas quando variou a temperatura de têmpera. Quando temperado a temperatura intercrítica, o material apresentou estrutura bifásica, e quando temperado acima da temperatura crítica obteve uma estrutura martensítica.

Contudo, os aços inoxidáveis ferríticos são susceptíveis a precipitação de carboneto de cromo ( $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ ) após seu processo de fabricação, gerando regiões empobrecidas em Cr, e podendo produzir susceptibilidade a corrosão intergranular, este fenômeno é conhecido como sensitização (LIMA; ABREU, 2002). Portanto, o objetivo do presente estudo é avaliar a susceptibilidade à corrosão do material quando submetido a tratamento isotérmico, além da capacidade de endurecimento e microestrutura.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1. Materiais

O material estudado é conhecido como 410D, e produzido pela empresa Aperam South America. Pela sua composição química este pode ser classificado como S41003, de acordo com a norma ASTM A276 (2013) (Tab. 1).

Tabela 1 - Composição química do 410D (% em peso)

Elemento	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni
Concentração	0,0150	0,58	0,50	0,028	0,0008	11,16	0,34
Classe S41003	≤0,030	≤1,5	≤1,0	≤0,04	≤0,015	10,5-12,5	≤1

Fonte: o autor.

Segundo Folkhard (1988), teores de 0,01% C são suficientes para produzir sensitização nos aços inoxidáveis ferríticos, deste modo, o teor de carbono do material estudado é suficiente para precipitação de carboneto de cromo.

Além disso, devido à baixa concentração de cromo e adição de níquel, o material pode ser austenitizado quando submetido a elevadas temperaturas, possibilitando a formação de martensita quando resfriado rapidamente (FARIA *et al.*, 2020).



## 2.2. Procedimentos Experimentais

As amostras possuem espessura de 5,4mm e dimensões de 25,3 x 20,8mm. O tratamento isotérmico constituiu em temperar as amostras a 1000°C por 5 min e 240 min, com resfriamento em água.

### 2.2.1 Ensaios de Dureza

O ensaio de dureza Vickers desenvolveu-se de acordo com a norma ASTM E 92-82 (2013), em um durômetro da marca Mitutoyo, modelo HM-100. Foi utilizado uma carga de 10kgf, em um tempo de 10s, um total de 10 indentações.

### 2.2.2 Caracterização Microestrutural

As amostras, no seu estado de entrega e depois do tratamento térmico, foram preparadas metalograficamente com lixa d'água de granulometria de 220, 320, 400, 500, 600 e 2000; em seguida, polidas com alumina em suspensão de granulometria de 1 µm e 0,5 µm. Para o ataque químico, utilizou-se a solução 81 (vilella) aplicada por imersão durante 40s, de acordo com a ASTM E407 - 07(2015). Para as análises microscópicas, foi utilizado o microscópio óptico de marca ZEISS, modelo AXIO imager M2m.

### 2.2. Ensaio de corrosão

Para o ensaio de corrosão, de acordo com a norma ASTM A 763-prática W, foi utilizado o reativo com 10g de ácido oxálico e 100ml de água destilada. As amostras polidas foram atacadas com auxílio de uma fonte a 10V por 40s, e em seguida lavadas com álcool.

Segundo a norma, as classificações conforme o modo de ataque são:

- Aceitável:
  - » “Step”- somente degraus entre os grãos;
  - » “Dual”- algumas valas, mas nenhuma completamente em volta do grão.

Além de degraus entre os grãos.

- Inaceitáveis:
  - » “Ditch” – um ou mais grãos completamente cercados por vala.

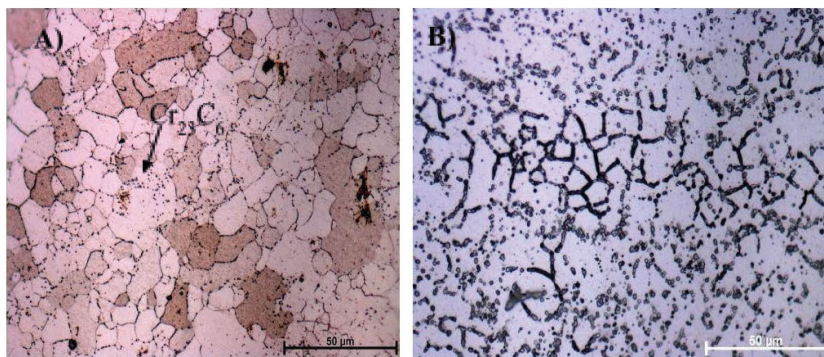
As estruturas aceitáveis indicam resistência ao ataque intergranular do tipo carboneto de cromo.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1. Amostra no estado de entrega

Na análise de microestrutura da amostra no seu estado de entrega, pode-se perceber a presença de carboneto de cromo, possivelmente do tipo  $Cr_{23}C_6$ , e grãos de ferrita poligonais, Figura 1.A. Já na imagem da amostra após o ensaio de corrosão é possível observar uma pequena susceptibilidade à sensitização, com corrosão do tipo “Dual” segundo a norma ASTM A 763, Figura 1.B. No ensaio de dureza, a amostra apresentou uma dureza de  $(146 \pm 4)$  HV.

Figura 1 - Microestrutura do aço no estado de entrega A) Ataque Vilella B) Após ensaio de corrosão



Fonte: o autor.

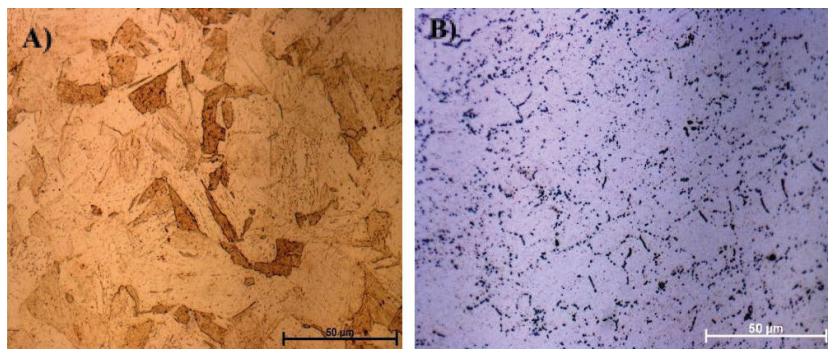
Uma provável causa da susceptibilidade à corrosão apresentada, é a presença de carboneto de cromo que causa o empobrecimento de cromo à sua volta, tornando o contorno de grão vulnerável à corrosão (SERNA-GIRALDO, 2006).

### 3.2. Amostra temperada por 5 min

A amostra temperada a 1000°C por 5 min. apresentou a menor susceptibilidade à sensitização que a amostra anterior, conforme a norma, a classificação do ataque é tipo “Step”, Figura 2.B. Possivelmente, devido a elevada temperatura, ocorreu a dissolução de parte dos carbonetos de cromo e difusão do cromo. Além disso, após a têmpera, ocorreu a formação de uma matriz martensita com grãos de ferrita, Figura 2. A. Como a formação da austenita para martensita, requer maior concentração de carbono, isso previne a precipitação de carboneto de cromo, diminuindo a sensitização (CARVALHO; MOREIRA; FARIA, 2018).

No ensaio de dureza, a amostra apresentou uma dureza de  $(288 \pm 8)$  HV. Um aumento de 74% relação a amostra no estado de entrega, justificado pela presença de martensita na amostra temperada.

Figura 2 - Microestrutura do aço temperado por 5 min A) Ataque Vilela B) Após ensaio de corrosão

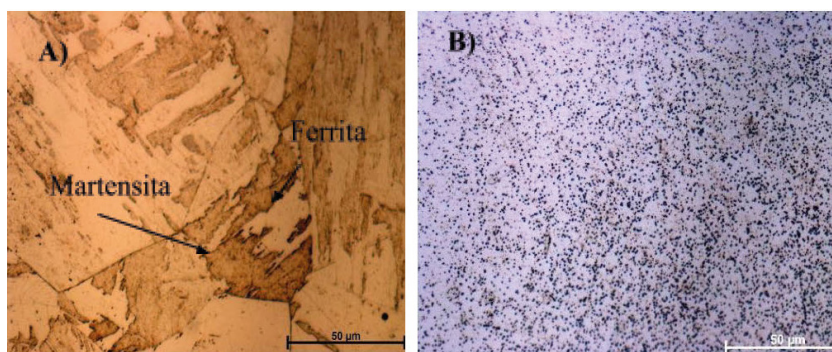


Fonte: o autor.

### 3.3. Amostra temperada por 240 min

A susceptibilidade à corrosão da amostra temperada por 240 min é imperceptível por microscopia óptica, como pode ser observado na Figura 3.B. A diminuição de susceptibilidade da amostra temperada mantida no tempo de austenização por mais tempo é causada, provavelmente, pelo aumento do volume de martensita, Figura 3A.

Figura 3 - Microestrutura do aço temperado por 240 min A) Ataque Vilella B) Após ensaio de corrosão



Fonte: o autor.

Entretanto, ainda é possível ver uma estrutura bifásica, ou seja, ferrita (fase clara) e martensita (fase escura). Além disso, devido à elevada temperatura, a velocidade de difusão do cromo na ferrita permitiu a homogeneização das regiões empobrecidas (VILLAFUERTE; KERR, 1992).

A amostra apresentou uma dureza de  $(262 \pm 3)$  HV, uma queda de dureza em relação ao aço temperado por 5 min., que pode ser explicada pelo aparente aumento de grão austenítico.

## 4. CONCLUSÕES

O presente trabalho concluiu que aço inoxidável ferrítico 410D, apesar de possuir baixo teor de carbono, pode ser endu-

recido por têmpera, formando uma matriz martensita com grãos de ferrita. Entretanto, com o aumento do tempo de austenitização ocorreu uma queda na dureza, justificada pelo aumento do grão austenítico.

Por outro lado, as amostras tratadas isotermicamente apresentaram menor susceptibilidade à corrosão intergranular, de acordo com a norma ASTM A 763-pratica W. Sendo que nenhuma das amostras apresentou estrutura inaceitável do tipo “Ditch”.

Portanto, apesar do aço 410D no seu estado de entrega apresentar baixa susceptibilidade à corrosão intergranular, a sensibilização se torna ainda menor após têmpera e com aumento do tempo de austenitização.

## REFERÊNCIAS

ASTM. **A276 - Standard Specification for Stainless Steel Bars and Shapes**. Pennsylvania: ASTM West Conshohocken, 2013.

ASTM. **A763 - Standard Practices for Detecting Susceptibility to Intergranular Attack in Ferritic Stainless Steels**. Pennsylvania: ASTM West Conshohocken, 1999.

ASTM. **E407 - 07 - Standard Practice for Microetching Metals and Alloys**. Pennsylvania: ASTM West Conshohocken, 2015.

ASTM. **R92-82 - Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Material**. Pennsylvania: ASTM, 2013.

BONIARDI, M.; CASAROLI, A. **Stainless Steels**. Brescia: Lucefin, 2014. 235 p.

CARVALHO, A. C; MOREIRA, P. S; FARIA, G. L. Efeito do tempo e da temperatura de tratamento isotérmico sobre o tamanho de grão, dureza e susceptibilidade à corrosão intergranular de um aço inoxidável ferrítico. *In*: ENCONTRO NACIONAL DE ESTUDANTES DE ENGENHARIA METALÚRGICA - ENEMET, 18., 2018, São Paulo. **Anais** [...]. São Paulo, 2018. p. 17-30. ISSN 2594-4711. DOI 10.5151/2594-4711-0231217.

COSTA E SILVA, A. L. V.; MEI, P. R. **Aços e ligas especiais**. 3. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2010.

FARIA, G. L. *et al.* Effect of martensite volume fraction on the mechanical behavior of an UNS S41003 dual-phase stainless steel. **Materials Science and Engineering: A**, v. 797, oct. 2020.

FOLKHARD, E. **Welding metallurgy of stainless steels**. New York: Springer Verlag, 1988.

LIMA, A. S.; ABREU, H. F. Aspectos da Corrosão Intergranular dos Aços Inoxidáveis Austeníticos AISI 304L, AISI 316L, AISI 321 e AISI 347, Usados em Refinarias. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE CORROSÃO, 22.; CONFERÊNCIA SOBRE TECNOLOGIA DE EQUIPAMENTOS, 6.; 2002, Salvador. **Anais [...]**. Salvador: COTEQ, 2002.

MODENESI, P. J. **Soldabilidade dos Aços Inoxidáveis**. São Paulo: SENAI, 2001.

NUNES, I. P. **Influência de tratamentos térmicos de têmpera a partir de austenitização intercrítica no comportamento mecânico de um aço inoxidável bifásico do tipo UNS S41003**. 2020. 77 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2020.

SERNA-GIRALDO, C. A. **Resistência à Corrosão Intergranular do Aço Inoxidável Ferrítico UNSS S43000**: avaliação por Método de Reativação Eletroquímica, efeito de Tratamento Isotérmico e Mecanismo de Sensitização. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

SUNDQVIST, J. *et al.* Laser surface hardening of 11 % Cr ferritic stainless steel and its sensitisation behaviour. **Surf. Coatings Technol**, v. 344, p. 673-679, jun. 2018.

VILLAFUERTE, J. C.; KERR, H. W. Phase transformation in stainless steel weld metal and heat-affected zone. **Key Engineering Materials**, v. 69 e 70, p.129-148, 1992.

# SIMULAÇÃO DA CAMADA LIMITE UTILIZANDO FERRAMENTA DE CÓDIGO ABERTO

Sara Gabriela Rodrigues de Andrade Silva<sup>1</sup> (sara.gabriela@discente.ufg.br)  
Leonardo de Queiroz Moreira<sup>1</sup> (lqmoreira@ufg.br)

<sup>1</sup>Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação - Universidade Federal de Goiás

**Resumo:** O presente trabalho visa apresentar uma fundamentação teórica sobre a simulação de escoamentos sobre um terreno plano utilizando o OpenFoam, para determinação do potencial eólico de um determinado local. Para isso, a metodologia adotada foi a busca de um alicerce em bibliografias consagradas sobre a mecânica dos fluidos. A metodologia proposta permitiu concluir que os escoamentos sobre terrenos planos devem ser modelados fisicamente pela teoria da camada limite; a modelagem matemática é feita pelas equações acopladas da continuidade e de Navier-Stokes, porém para regimes turbulentos é necessário recorrer à dinâmica dos fluidos computacional (CFD) e à modelagem da turbulência.

**Palavras-chave:** camada limite; CFD; MVF; OpenFoam.

## 1. INTRODUÇÃO

De acordo com relatório do Panorama Energético Mundial 2022, publicado pela *International Energy Agency* (IEA, 2022), o mundo está no meio de sua primeira crise global de energia. A Rússia tem sido, de longe, o maior exportador mundial de combustíveis fósseis, mas suas ações de cortes no fornecimento de gás natural para a Europa e as sanções europeias às importações de petróleo e carvão da Rússia estão cortando uma das principais artérias do comércio global de energia. Todos os combustíveis são afetados, mas os mercados de gás são o epicentro, já que a Rússia busca alavancagem expondo os consumidores a contas de energia mais altas e escassez de suprimentos.

Diante da escassez de suprimento de energia, dos altos preços, da vulnerabilidade do mercado de energia, ficou evidente a fragilidade e insustentabilidade da atual matriz energética mundial, que depende majoritariamente de combustíveis fósseis. Com isto, a pauta de transição das matrizes energética e elétrica, que já fazia parte da agenda de vários programas mundiais de defesa ao meio ambiente, ganha agora uma nova urgência como uma alternativa à independência do suprimento de energia, alcançando um sistema de energia mais limpo, acessível e seguro.

A matriz elétrica brasileira possui hoje cerca de 84% de capacidade de geração de energia renovável e limpa, enquanto o mundo possui uma média de apenas 27% (ABEÉOLICA, 2021). No Brasil, isto se deve principalmente à energia hidrelétrica, que é uma fonte renovável e limpa, que utiliza o movimento natural da água para geração de energia. Porém, em períodos de estiagem das chuvas há um comprometimento no abastecimento da energia proveniente das águas. Além disso, um ponto ambiental negativo das usinas hidrelétricas é que além de requererem uma



localização mais específica, é grande a quantidade de espaço alagado em sua construção, que pode prejudicar uma quantidade imensa de fauna e flora.

Uma alternativa às usinas hidrelétricas que ocupam o segundo lugar na matriz elétrica do Brasil são os parques eólicos, que utilizam a energia cinética dos ventos em sua geração de energia. A energia eólica é uma fonte renovável, limpa, gratuita, abundante e ocupa pouca terra, permitindo que se continue com criação de animais ou plantações. Considerando o espaço destinado para um parque eólico, as turbinas ocupam cerca de 8% da área, podendo esse valor ser ainda menor, chegando a cerca de 6% (ABEÉOLICA, 2021).

De acordo com a IEA (2022), em 2021, a geração de eletricidade eólica no mundo aumentou em um recorde de 17%. Este foi um crescimento 55% maior do que o alcançado em 2020 e foi o mais alto entre todas as tecnologias de energia renovável. Dentre os países responsáveis pela nova capacidade instalada no ano de 2021, o Brasil aparece em terceiro lugar, atrás apenas da China e dos Estados Unidos.

O planejamento de parques eólicos exige uma avaliação de sensibilidade aprimorada do ambiente circundante para garantir a eficiência da turbina a longo prazo e retornos atraentes sobre o investimento (IEA, 2022). Desta forma, antes da implantação destes parques, a primeira etapa é conhecer o potencial eólico do local onde se pretende instalar um parque eólico, isto é, deve-se prever o potencial de geração de energia elétrica a partir da energia cinética dos ventos.

Uma das formas de investigação do potencial eólico em uma determinada região é através da simulação do escoamento do vento, por meio de ferramentas da dinâmica dos fluidos compu-

tacional (CFD). Portanto, o presente trabalho visa a construção de uma base teórica sobre modelagem física, matemática e numérica computacional do escoamento do ar sobre terrenos planos, para posterior obtenção de um processo e ou ferramenta, de forma a contribuir para a indústria de geração, transformação e transmissão de energia.

## 2. METODOLOGIA

Este capítulo tem como objetivo fazer uma revisão bibliográfica sobre os fenômenos envolvidos na modelagem e simulação do escoamento do ar sobre um terreno plano. Para isto, a metodologia adotada foi a busca de um alicerce em bibliografias consagradas sobre a teoria da camada limite, a modelagem matemática de escoamentos de fluidos, a dinâmica dos fluidos computacionais e sobre o software de CFD *OpenFoam*.

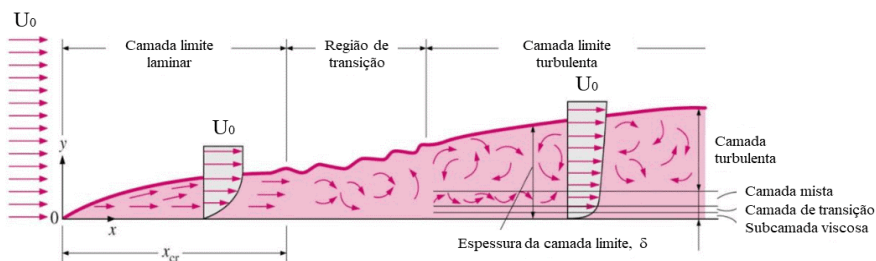
### 2.1. Teoria da Camada Limite

A dinâmica do escoamento de ventos sobre terrenos, turbinas e torres eólicas é caracterizada pela teoria da camada limite, introduzida pioneiramente em 1904 pelo alemão Ludwig Prandtl, marcando o começo da era moderna na mecânica dos fluidos. Prandtl mostrou que o escoamento que passa por um corpo pode ser dividido em duas regiões: uma camada muito fina próxima ao corpo (camada limite) onde a viscosidade é importante, e a região restante fora desta camada onde a viscosidade pode ser desprezada (PRANDTL, 1904 *apud* SCHLICHTING; GERSTEN, 2000). Desta forma, a camada limite proporcionou uma maneira de impor a condição de não escorregamento na interação fluido-estrutura, o que antes não acontecia nos cálculos de escoamento dos fluidos e gerava uma grande discrepância entre a teoria e a realidade dos escoamentos.

Segundo Çengel e Cimbala (2012), pode-se considerar que o fluido é formado por camadas adjacentes uma sobre as outras. A velocidade das partículas na primeira camada de fluido adjacente à placa se torna zero devido à condição de não-escorregamento. Essa camada sem movimento retarda as partículas da camada vizinha de fluido devido ao atrito entre as partículas dessas duas camadas de fluido adjacentes com diferentes velocidades e assim sucessivamente. Desta forma, a presença da placa é sentida até uma distância normal  $\delta(x)$  da placa, conforme Fig.1.

A espessura da camada limite,  $\delta(x)$ , é usualmente definida como a distância normal à superfície na qual a velocidade do escoamento atinge 99% da velocidade externa,  $U_0$ . Vale ressaltar que a espessura  $\delta(x)$  é muito delgada tanto para o regime laminar, quanto para o regime turbulento. Porém, conforme Fig.1, no regime turbulento a espessura da camada limite aumenta significativamente.

Figura 1 - Camada limite sobre uma placa plana



Fonte: ÇENGEL; CIMBALA (2012).

A Fig. 1 apresenta o esboço de um escoamento sobre uma placa plana. Um fluido com perfil de velocidade uniforme  $U_0$ , a montante da borda frontal da placa, entra em contato com a placa e desenvolve inicialmente uma camada limite laminar, com espessura  $\delta(x)$ . Após uma distância,  $X_{cr}$ , o escoamento laminar

passa por um breve processo de transição que a jusante resulta em um escoamento turbulento.

A distância  $X_{cr}$  de transição do regime laminar para turbulento depende da geometria e da rugosidade da superfície, da velocidade a montante, da temperatura da superfície, do tipo de fluido, entre outros parâmetros, e é caracterizada pelo número de Reynolds crítico,  $Re_{cr} = U_0 X_{cr} / \nu$ , onde  $\nu$  é a viscosidade cinemática do fluido. Segundo Schlichting e Gersten (2000) e Çengel e Cimbala (2012), um valor do número de Reynolds crítico geralmente aceito para uma placa plana é de  $5 \times 10^5$  podendo variar até  $3 \times 10^6$ .

Um escoamento se torna turbulento quando os mecanismos de transporte advectivos, processo de transporte de uma dada informação devido ao movimento da matéria, superam os mecanismos de transporte difusivo. A relação entre os efeitos advectivos e os efeitos difusivos é determinada pelo número de Reynolds ( $Re$ ), definido pela Eq. 1:

$$Re = \frac{U_0 L}{\nu} = \frac{\text{Termos advectivos}}{\text{Termos difusivos}} \quad (1)$$

A turbulência nos fluidos é um regime de escoamento o qual é caracterizado como um fenômeno tridimensional, rotacional, altamente difusivo e dissipativo, contínuo e imprescindível e ocorre a altos números de Reynolds. Estas características conferem à turbulência nos fluidos um caráter totalmente não linear. Além do mais, escoamentos turbulentos apresentam um amplo espectro de energia, possuindo uma larga banda de frequências, ou seja, apresentam estruturas com baixos e altos números de onda. As interações entre estruturas de tamanhos variados constituem um refinado e complexo processo de troca de energia (MOREIRA, 2011).

## 2.2. Modelo Matemático

Um modelo matemático tem como objetivo representar um problema físico matematicamente. Neste contexto, o fluido de interesse deste trabalho, o ar, é classificado como fluido newtoniano. Nestes fluidos, as taxas de deformação local são proporcionais às taxas de tensões cisalhantes. A maioria dos fluidos de interesse prático, em particular o ar e a água, pertencem a esta classe.

O modelo matemático para um fluido newtoniano, incompressível e isotérmico, a ser tratado neste trabalho, é composto da equação da continuidade e por três equações diferenciais da quantidade de movimento linear, conhecidas como equações de Navier-Stokes. As deduções destas equações não serão aqui abordadas, mas podem ser encontradas em diversos livros sobre mecânica dos fluidos, como Silveira Neto (2020) e Çengel e Cimbala (2012).

A equação da continuidade é obtida através do balanço de

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) = 0 \quad (2)$$

massa sobre uma partícula infinitesimal de fluido. Em sua forma mais geral a equação da continuidade pode ser escrita como:

Para o caso de escoamento incompressível, um escoamento no qual a massa específica ( $\rho$ ) da partícula de um fluido não muda com o tempo, a equação da continuidade toma a forma:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

As EDP's da quantidade de movimento linear são enunciadas como segue:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (4)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (5)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (6)$$

Devido aos termos não lineares presentes nestas equações, as soluções analíticas são limitadas a escoamentos laminares, de geometria e condições de contorno simples, assim a maior parte dos escoamentos reais não possuem solução analítica. Um paliativo para solução de problemas mais complexos, seria recorrer a experimentação em laboratório, a grande vantagem é o fato de tratar com a configuração real. Porém, muitas vezes os custos e o tempo de experimentação são proibitivos e nem sempre os problemas são passíveis de reprodução.

Segundo Fortuna (2012), com o advento do computador em 1950, surgiu uma terceira alternativa: obter, pela solução numérica das equações de Navier-Stokes utilizando técnicas computacionais, o campo de velocidade e de pressão que compõem o escoamento. Surgiu, então, a área da computação científica que estuda os métodos computacionais para simulação de fenômenos que envolvem fluidos em movimentos com ou sem trocas de calor, denominada Dinâmica dos Fluidos Computacional ou CFD, do inglês *computational fluid dynamics*.

### 2.3. Dinâmica dos Fluidos Computacional

O CFD utiliza técnicas de métodos numéricos resolver as equações diferenciais parciais ou ordinárias que modelam o problema, substituindo as derivadas existentes no modelo matemático do escoamento, por meio de um conjunto de expressões algébricas que devem ser solucionadas para um número discreto de pontos do modelo. Fortuna (2012) resumiu as etapas para obtenção da solução numérica de um problema de fluidos de acordo com o fluxograma da Fig. 2.

Figura 2 – Etapas para a obtenção da solução numérica de um problema de fluidos



Fonte: FORTUNA (2012).

Segundo Silveira Neto (2020), é consenso que com as Equações de Navier-Stokes, acopladas à equação da continuidade mais a equação de energia, modelam-se, indistintamente, escoamentos laminares e turbulentos. No entanto, a solução destas equações para escoamentos turbulentos, a altos Números de Reynolds, ainda não é possível com as máquinas atualmente disponíveis, utilizando os métodos numéricos existentes, na atualidade, para soluções de EDP's.

Devido à complexidade dos escoamentos turbulentos, às não linearidades, ao amplo espectro de energia e ao grande número de graus de liberdade as simulações CFD de escoamentos turbulentos são muito complexas. Portanto, a solução alternativa que vem sendo utilizada historicamente são as metodologias de modelagem da turbulência. Atualmente existem três diferentes abordagens de modelagem a turbulência: 1) Equações de Navier-Stokes Média de Reynolds (RANS) ou Equações Transientes de Navier-Stokes Média de Reynolds (URANS); 2) Simulação Computacional Direta (DNS) e 3) Simulação das grandes estruturas da Turbulência (Large Eddy Simulation - LES)

A escolha da metodologia depende do objetivo almejado. Se o objetivo com a análise é o resultado médio dos escoamentos, então a filosofia mais adequada é a URANS. Se o que se almeja são

resultados refinados e detalhados sobre o escoamento, a metodologia DNS é a indicada. Porém, para altos números de Reynolds, a metodologia DNS não é viável, pois os custos computacionais tornam-se proibitivos. Nesse caso, a metodologia LES fornece mais detalhes que URANS e é praticável para altos valores do Número de Reynolds. (SILVEIRA NETO, 2020)

## 2.4. OpenFOAM®

Existem disponíveis hoje uma série de softwares dedicados à solução numérica de EDP's, especificamente desenvolvidos para o uso em CFD. Dentre eles, podemos destacar o OpenFOAM®, abreviação para *Open source Field Operation And Manipulation*, é o principal software de código aberto gratuito para a CFD. OpenFOAM® é um pacote de ferramentas em linguagem C++ dividido em diferentes bibliotecas que podem ser usadas para resolver problemas de fluxos de fluidos usando a abordagem de volume finitos.

Volume finitos é o método de discretização do modelo matemático, no qual o domínio espacial do fenômeno de estudo deve ser dividido em volumes infinitesimais, o domínio espacial discretizado é denominado de malha. Em seguida, as EDP's que regem o problema devem também ser discretizadas, isto é, representar as derivadas espaciais e temporais por expressões algébricas através de métodos numéricos, a fim de realizar o balanço de uma dada informação em análise em cada volume infinitesimal do escoamento de todo o domínio.

Existem três etapas básicas para simulação de um escoamento no OpenFoam. A primeira é a etapa de pré-processamento, esta é a etapa de geração da malha e imposição das condições de contorno e condições iniciais (campos de pressão e velocidade iniciais, condição de não escorregamento etc.), das propriedades físicas dos fluidos, e dados de controle do tempo.



A segunda etapa é a etapa de simulação, onde o software faz os cálculos das informações do escoamento do fluido através do método de volume finitos e armazena em diretórios de tempo. Feito isso, começa a terceira etapa de pós-processamento, no qual os dados gravados podem ser visualizados pelo aplicativo de visualização *ParaView*. Nesta etapa não basta apenas a geração de gráficos e figuras, mas é necessária uma análise crítica dos resultados obtidos, através da verificação e validação do modelo em relação ao fenômeno físico real.

### 3. CONCLUSÕES

A simulação do escoamento do vento sobre um terreno plano para previsão do potencial eólico de uma região pode ser feita através da dinâmica dos fluidos computacional, pela teoria da camada limite. Este tipo de escoamento é modelado matematicamente pelas equações da continuidade e de Navier-Stokes. Devido à complexidade dos escoamentos turbulentos, ainda não existem soluções numéricas computacionais capazes de resolver diretamente estas equações. A alternativa a este problema encontra-se na modelagem da turbulência.

Atualmente existem três abordagens de modelagem da turbulência: URANS, LES e DNS. A escolha de qual modelo utilizar depende do objetivo a ser alcançado, do tipo de escoamento e dos recursos disponíveis. Em resumo, o URANS modela o comportamento médio do escoamento, o DNS modela todo o espectro de energia da turbulência, o que acaba sendo inviável para altos números de Reynolds e o LES que fornece maior detalhes do escoamento e é aplicável a escoamentos à altos números de Reynolds.

O OpenFoam é um software de simulação CFD, que possui em sua biblioteca os modelos de turbulência para simulação de

escoamentos turbulentos. Ao usá-lo é sempre importante fazer a verificação do modelo e validação dos resultados obtidos, para obtenção de resultados coerente com o problema real e a física.

#### 4. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Furnas Centrais Elétricas, ao apoio financeiro do “Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico” (P&D) da ANEEL e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES).

#### REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA - ABEÉolica. **Boletim Anual 2021**. 2021. Disponível em: <https://abeeolica.org.br/energia-eolica/dados-abeeolica/>. Acesso em 11 nov. 2022.

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.

FORTUNA, A. de O. **Técnicas Computacionais para Dinâmica dos Fluidos: Conceitos Básicos e Aplicações**. 2. ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2012.

IEA. **World Energy Outlook 2022**. Paris: IEA 2022. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>. License: CC BY 4.0 (report). CC BY NC SA 4.0 (Annex A).

MOREIRA, L. Q. **Modelagem Matemática de Jatos em Desenvolvimento Espacial Usando a Metodologia Pseudoespectral de Fourier**. 2011. 197 f. Tese (Doutorado em Engenharias) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011.

SCHLICHTING, H.; GERSTEN, K. **Boundary-Layer Theory**. 8. ed. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2000.

SILVEIRA NETO, A. **Escoamentos Turbulentos: Análise Física e Modelagem Teórica**. Revisado por José Carlos da Silva. Uberlândia: Editora Composer, 2020.

# REVISÃO BIBLIOGRÁFICA: REVESTIMENTOS DE LIGAS DE COBALTO, CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL E ANÁLISE TRIBOLÓGICA

Thales Marcelo Pereira Rodrigues<sup>1</sup> (thales\_rodrigues@discente.ufg.br)  
Demostenes Ferreira Filho<sup>1</sup> (demostenesferreira@ufg.br)

<sup>1</sup>UFG - Universidade Federal de Goiás

**Resumo:** Um critério relevante para o ramo metal-mecânico é a avaliação do desgaste. Então, a fim de reduzir os efeitos tribológicos, foram desenvolvidos métodos de revestimento superficial. Para essa aplicação, é necessário o fornecimento de uma fonte de calor, com a finalidade de fundir o substrato e a liga de revestimento para que ambos interajam. Logo, o substrato melhorará sua resistência aos efeitos tribológicos. Com o objetivo de fundamentar o trabalho, foi realizado o levantamento de alguns artigos os quais foram submetidos ao filtro do valor do percentil, portanto os artigos selecionados deveriam ter classificação mínima de classe A3, segundo o critério Qualis. Devido ao estresse térmico gerado, após a aplicação do revestimento, é importante realizar a avaliação da microestrutura e da resistência ao desgaste. Portanto, observa-se que a aplicação de revestimento superficial é de grande valia para meio produtivo, pois é possível melhorar as características do substrato e, consequentemente, reduzir custos.

**Palavras-chave:** liga de cobalto; microestrutura; pino-disco; revestimento superficial.

## 1. INTRODUÇÃO

No ramo metal-mecânico, um importante critério avaliado é o desgaste, porque, de acordo com Stoeterau (2004), a mudança indesejável das dimensões da superfície provocada pelo movimento relativo provocará a redução da vida útil do ativo. Assim, a fim de reduzir os efeitos tribológicos, as técnicas de manufatura aditiva foram desenvolvidas.

Essas técnicas, consoante a Debroy *et al.* (2018), são provenientes de processos de fabricação que adicionam de forma progressiva material sobre uma peça de substrato. Assim, a manufatura aditiva pode se diferenciar segundo a forma de deposição do revestimento: Deposição de energia direcionada (DED) e Fusão em Pó - Powder Bed Fusion (PBF). Então, o primeiro método a superfície do substrato é fundida e a liga de revestimento é inserida na poça de fusão. Para o segundo método, a liga usada para o revestimento duro é pulverizada e, após a fusão do substrato, o pó é adicionado à poça de fusão.

Como fonte de energia para ligação metalúrgica, é possível citar as técnicas mais comuns: oxiacetileno soldagem a gás (OAW), soldagem a arco com eletrodo de tungstênio a gás (GTAW) ou soldagem a *tungsten inert gas* (TIG), soldagem a arco submerso (SAW) e soldagem a arco transferido por plasma (PTA), de acordo com Madadi *et al.* (2012).

Por conseguinte, a fim de garantir uma melhor resistência ao substrato, é necessário o uso de ligas com características nobres. Assim, é necessário que esses materiais tenham alta resistência, tais como, desgaste, corrosão e dureza.

Dentre as ligas utilizadas, uma que adquiriu espaço no mercado é a liga à base de cobalto. Essa solução sólida, segundo YAO *et al.* (2018), apresenta nível elevado de cromo, quantidade moderada de tungstênio ou molibdênio com uma porção de carbono.

Assim, a formação de carbonetos embutidos garante formidável resistência ao desgaste.

Diante do exposto, a família das soluções sólidas baseadas em cobalto recebe uma designação comercial de *Stellite*. Sua aplicação, de acordo com YAO *et al.* (2005), pode ser em: rolos de esmagamento de rochas, sistemas de transporte, escudos de erosão de turbinas a vapor e buchas onde a lubrificação é inacessível ou lubrificação eficaz é impossível.

Como representantes da família da *Stellite*, de acordo com Yao *et al.* (2005), existem 6B, 6K e 706k. A primeira é amplamente utilizada em rolos de esmagamento de rochas, no entanto a segunda é empregada em sistemas de corte. Posto que a *Stellite* 6K tenha uma aplicação para sistemas de corte, ela possui vulnerabilidade em ambientes corrosivos, porque ocorre a formação de *pitting*. Então, a fim de corrigir essa lacuna, foi desenvolvida a liga 706k a qual possui aplicação similar à 6k, entretanto possui resistência à ambientes corrosivos.

Logo, o objetivo desse artigo é realizar uma revisão técnica sinalizando as vantagens para o uso de tal solução sólida.

## 2. MÉTODOS UTILIZADOS PARA LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

Para o levantamento bibliográfico, foi utilizado o buscador PERIÓDICOS CAPES e os livros teóricos de mecânica do desgaste e de soldagem. Por conseguinte, as pesquisas totalizaram por volta de vinte artigos. Logo, ao acessar o site, como base do filtro de pesquisa, foi definido como palavras-chave: ligas de cobalto, aplicações de ligas de cobalto, ensaio de desgaste, análise metalográfica e métodos de aplicação de revestimento.

Portanto, como critério de seleção dos artigos utilizados como base, foi definido o parâmetro de aceitação Qualis classe A3, ou

seja, segundo o valor do percentil definido por meio do Scopus, o artigo deveria ser superior a setenta e quatro por cento.

### 3. PROCESSOS DE REVESTIMENTO APLICADOS A LIGAS DE COBALTO

Conforme Madadi *et al.* (2012), o revestimento superficial do substrato é uma tecnologia, cuja liga projetada modifica a superfície do substrato, a fim de melhorar as propriedades do material de base com auxílio das características nobres da solução sólida selecionada.

Por conseguinte, as técnicas mais estudadas para realizar o recobrimento do substrato com o uso de ligas baseadas em cobalto, consoante ao Yao *et al.* (2018), são as soldagens a *tungsten inert gas* (TIG) e a Laser.

Segundo Yao *et al.* (2018), no processo TIG, o substrato é fundido pelo intenso calor gerado por meio do aro elétrico, logo ocorre a formação da poça de fusão a qual servirá de fonte de energia para modificar o estado físico da liga de revestimento, ou seja, a liga de cobalto passará do estado sólido para o líquido o que garantirá a interação entre o revestimento e o substrato.

Para o processo a Laser, de acordo com Lin *et al.* (2006), o revestimento feito por tal técnica é caracterizado por depositar uma camada laminar no substrato. Esse efeito é provocado por meio do fornecimento de energia controlável tornando o artifício formidável, porquanto ocorre diluição mínima devido à baixa produção de calor, além de evitar distorções microestruturais.

### 4. MICROESTRUTURAS DAS LIGAS DE COBALTO

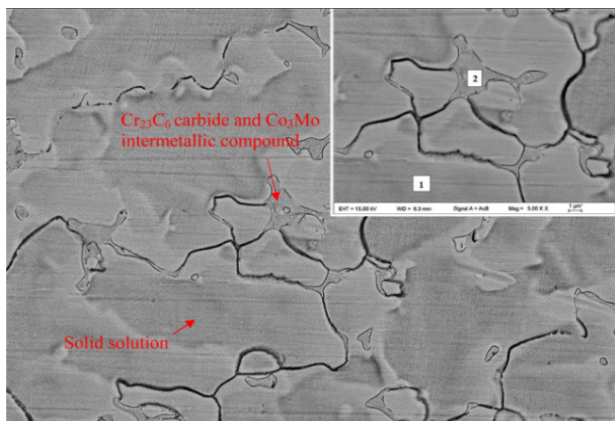
De acordo com Yao *et al.* (2018), a microestrutura da liga de cobalto apresenta duas regiões com concentrações químicas diferentes. Assim, existe uma banda de maior concentração de cobal-

to e outro setor com maiores conteúdos de molibdênio e carbono. Portanto, a mistura eutética gerada, possivelmente, é rica em carboneto de cromo. Conforme sinalizado na Fig. 1.

Outro aspecto em relação à microestrutura da solução sólida da liga de cobalto importante, conforme Brownlie *et al.* (2018), ocorre na interação entre o revestimento e o substrato após a fusão dos materiais, então, nesse momento, ocorre um rearranjo estrutural típico de dendritas. Por óbvio, as dendritas primárias de cobalto são cercadas por carbonetos ricos em cromo. É possível observar, segundo a Fig. 2, a existência de carbonetos dispersos mais finos e uma pequena porção de tungstênio.

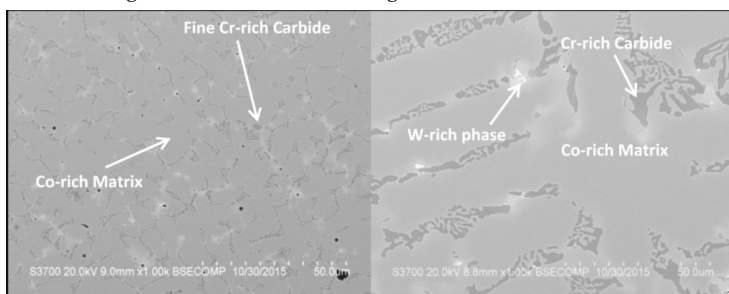
Ao analisar a composição química da liga de cobalto, segundo Yao *et al.* (2018), grande parte apresenta baixo teor de carbono, conseqüentemente, a formação de carbonetos ficará deficitária. Portanto, a resistência ao desgaste ficará comprometida. Como solução ao dilema, é possível aumentar o percentual de molibdênio. Logo, a liga precipita mais cobalto-molibdênio ( $\text{Co}_3\text{Mo}$ ) o que aumenta a resistência ao desgaste.

Figura 1 - Microestrutura da liga de cobalto



Fonte: YAO *et al.* (2018).

Figura 2 - Microestrutura da liga cobalto no revestimento

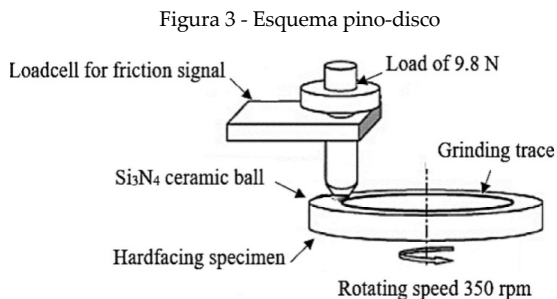
Fonte: BROWNIE *et al.* (2018).

## 5. ENSAIO DE DESGASTE APLICADO A LIGA DE COBALTO

Conforme citado anteriormente, o uso da solução sólida para realizar o revestimento do metal de base e a possibilidade da liga que revestirá o substrato fornecer suas características nobres, por exemplo, a resistência ao desgaste. Dessa forma, é possível enumerar alguns tipos de desgaste, tais como, desgaste por adesão, abrasão, corrosão, fadiga e erosão. Então, como forma de validar a resistência ao desgaste, uma parcela significativa de autores foca em desgaste por abrasão e corrosão. Logo, os métodos que validam esses desgastes respectivamente são: pino-disco e corrosivo.

Para o ensaio com o uso do pino-disco, segundo à ASTM G99-17, são necessários um pino com a ponta arredondada e um disco plano em que o pino fique posicionado perpendicularmente ao disco. Logo, ao realizar o movimento circular de um dos elementos ocorrerá a remoção de material formando um caminho orientado. Por meio desse caminho, é possível definir o nível de resistência ao desgaste do material. Um modelo esquemático é definido na Fig. 3. Em relação ao desgaste por corrosão, conforme Brownlie *et al.* (2018), é realizada uma circulação de cloreto de sódio (NaCl) em concentração de 3,5%, a fim de avaliar o desgaste de amostras polidas.





Fonte: YAO *et al.* (2018).

Conforme Lin *et al.* (2006), o método pino-disco foi utilizado, a fim de comparar a perda de massa em função da distância deslizante, assim foi observado que a taxa de desgaste da *Stellite 6* é constante e menor que um aço AISI 410. Portanto, pode ser justificado pelo endurecimento na região subsuperficial. Já Brownlie *et al.* (2018), com uso de circulação de NaCl, comparou o desgaste de tribo corrosão entre *Stellite 6* e inox 316, logo observou-se similaridade no critério.

## 6. CONCLUSÃO

Com o advento da manufatura aditiva, foi possível empregar processos que pudessem reduzir os custos de manutenção nos equipamentos. Dentre eles, é possível enfatizar a redução ao desgaste, pois os elementos em contato que desenvolvem movimento relativo, naturalmente, serão suscetíveis ao desgaste por atrito.

Portanto, as ligas de cobalto são empregadas com tal finalidade. Assim, ao aplicar a metodologia adequada, é possível fornecer ao substrato todos os benefícios existentes do material de revestimento. Contudo, vale ressaltar que, segundo as características dos materiais, é possível modificar a estrutura do material, devido às distorções da microestrutura submetidas às variações térmicas.

Por isso, ao desenvolver um processo de adição de material, é necessária uma investigação aprofundada, a fim de validar se as características da solução sólida não foram afetadas, o que garantirá a redução dos efeitos tribológicos ao substrato.

## REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM G65 - Standard Test Method for Wear Testing a Pin-on-Disk Apparatus**. West Conshohocken, 2000.

BROWNLIE, F.; ANENE, C.; HODGKIESS, T.; PEARSON, A.; GALLOWAY, A. Comparison of Hot Wire TIG Stellite 6 weld cladding and lost wax cast Stellite 6 under corrosive wear conditions. **Wear**, v. 404-405, p. 71-81, 2018.

DEBROY, T.; WEI, H. L.; ZUBACK, J. S.; MUKHERJEE, T.; ELMER, J. W.; MILEWSKI, J. O.; BEESE, A. M.; WILSON-HEID, A.; DE, A.; ZHANG, W. Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties. **Progress in Materials Science**, v. 92, p. 112-224, 2018.

DING, Y.; LIU, R.; YAO, J.; ZHANG, Q.; WANG, L. Stellite alloy mixture hardfacing via laser cladding for control valve seat sealing surfaces. **Surface and Coatings Technology**, v. 329, p. 97-108, 2017.

LIN, W. C.; CHEN, C. Characteristics of thin surface layers of cobalt-based alloys deposited by laser cladding. **Surface and Coatings Technology**, v. 200, n. 14-15, p. 4557-4563, 2006.

MADADI, F.; ASHRAFIZADEH, F.; SHAMANIAN, M. Optimization of pulsed TIG cladding process of stellite alloy on carbon steel using RSM. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 510, n. 1, p. 71-77, 2012.

STOETERAU, R. L. **TRIBOLOGIA: EMC -5315-**. 2. ed. Santa Catarina: Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.

YAO, J.; DING, Y.; LIU, R.; ZHANG, Q.; WANG, L. Wear and corrosion performance of laser-clad low-carbon high-molybdenum Stellite alloys. **Optics & Laser Technology**, v. 107, p. 32-45, 2018.

YAO, M. X.; WU, J. B. C.; XU, W.; LIU, R. Metallographic study and wear resistance of a high-C wrought Co-based alloy Stellite 706K. **Materials Science and Engineering: A**, v. 407, p. 291-298, 2005.

# ESCOAMENTO COM BAIXO NÚMERO DE REYNOLDS SOBRE UM PAR DE CILINDROS

Thiago Rogaleski Marques<sup>1</sup> (thiagorogaleski@discente.ufg.br)

Andreia Aoyagui Nascimento<sup>1</sup> (aanascimento@ufg.br)

<sup>1</sup>Universidade Federal de Goiás - UFG

**Resumo:** O presente trabalho utiliza a Dinâmica dos Fluidos Computacional para realizar o escoamento sobre um par de cilindros lado a lado. A metodologia matemática baseou-se nas soluções da equação da conservação da massa e nas equações de Navier-Stokes para um número de Reynolds igual a 100 e 200. Para realizar os cálculos foi utilizado o Método Pseudoespectral de Fourier (MPEFO) acoplado à Metodologia da Fronteira Imersa (MFI), IMERSPEC. Nos resultados apresentados e discutidos valores para o Coeficiente de Arrasto e Coeficiente de Sustentação, além do entendimento físico sobre a formação e propagação da esteira de vórtices, também são realizadas as comparações com as referências.

**Palavras-chave:** Dinâmica dos Fluidos Computacional; MPEFO; arrasto; sustentação; IMERSPEC.

## 1. INTRODUÇÃO

O estudo da interação Fluido-Estrutura é de grande importância entre os pesquisadores, essa interação é um problema físico que pode ser observado em várias áreas, como em prédios, pontes, estruturas offshore, torres eólicas, chaminés e etc.

A Dinâmicas de Fluidos Computacional (*Computational Fluid Dynamics - CFD*) é uma ferramenta computacional que permite a investigação numérica a partir das equações de Navier-Stokes, permitindo a modelagem física do problema e análise da incidência das forças do escoamento sobre estruturas, assim compreendendo os fenômenos físicos.

Nos trabalhos de Mariano (2011) e Nascimento (2016), os autores utilizaram o Método Pseudoespectral de Fourier (MPEFO) acoplado a Metodologia da Fronteira Imersa (MFI), *direct-forcing method*, para solução de problemas fluido-estrutura. Mariano (2011) aplicou a metodologia para modelagem da queda de um corpo rígido e Nascimento (2016) na modelagem na movimentação de um corpo rígido (2-way), mostrando, em ambos, o potencial do MPEFO para essa aplicação.

Ding *et al.* (2006), usa do método de diferenças finitas em mínimos quadrados para estudar o campo de escoamento em torno de dois cilindros, para cada configuração diferentes arranjos são usados, simulando uma baixa faixa de Número de Reynolds (Re), encontram-se os valores para os Coeficientes de Arrasto e Sustentação, e também o Número de Strouhal.

A influência das forças fluido dinâmicas no escoamento sobre cilindros de base circular foi investigada pelos autores Lee *et al.* (2009). Em seu trabalho os autores mostraram a influência nos coeficientes de arrasto e sustentação, a partir da alteração na distância entre os cilindros de mesmos diâmetros. Os resultados apresentados são para  $Re=100$ , e várias configurações, e mostram

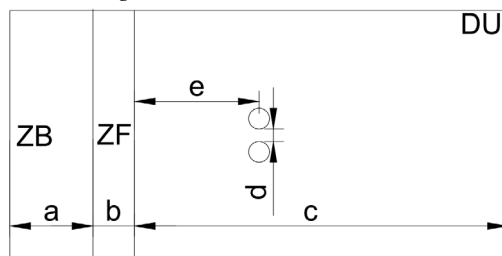
que para distância entre os cilindros de 1,5 a 2,0 o padrão de estruturas turbilhonares possuem uma característica regular. Para distância de 1,25 o escoamento se comporta com um único cilindro e o escoamento libera estrutura turbilhoares únicas.

O presente trabalho usa o IMERSPEC, um código computacional validado e verificado, que acopla o Método Pseudoespectral de Fourier (MPEFO) com a Metodologia da Fronteira Imersa (MFI), para o estudo do escoamento sobre um par de cilindros lado a lado, analisando sua esteira de vórtices e coeficientes de arrasto, e de sustentação.

## 2. METODOLOGIA

Para esse estudo utilizou as seguintes dimensões de domínio, onde  $D$  é o diâmetro dos cilindros, ' $a$ ' sendo a Zona de Buffer com distância de  $13D$ , ' $b$ ' a zona de forçagem com  $2D$ , ' $c$ ' o domínio útil com  $45D$ , ' $d$ ' a distância entre os cilindros com  $1,5D$  e ' $e$ ' a distância da zona de forçagem até os cilindros de  $15D$ , mostradas na Fig. 1.

Figura 1 - Domínio do escoamento



Fonte: o autor.

A metodologia utiliza de condições periódicas, sendo as geometrias inseridas pelo MFI. O fluido é modelado considerando um fluido newtoniano, isotérmico, com propriedades constantes, escoamento incompressível e bidimensional, na Tab. 1 está explicitado os parâmetros de simulação utilizados.

Tabela 1 - Parâmetros Gerais do escoamento

D	Diâmetro dos Cilindros	0,0016 [m]
	Número de pontos do domínio	1024x512
Re	Número de Reynolds	100
		200
CFL	Número de Courant-Friedricks-Lewis	0,1
t	Tempo Final	40 [s]
	Massa específica	0,001 [Kg.m-3]
	Velocidade Máxima	1 [m/s]
d	Distância entre os cilindros	1,5D

Fonte: o autor.

A modelagem matemática empregada usa da equação da conservação da massa, Eq. 1, juntamente com as equações de Navier-Stokes, Eqs. 2 e 3, onde  $\rho$  é a massa específica,  $\mu$  é a viscosidade,  $p$  é a variável de pressão,  $u$  o campo de velocidade na direção horizontal,  $v$  é o campo de velocidade vertical,  $t$  é a variável tempo, e  $f$  é o termo fonte da equação.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0, \quad (1)$$

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

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

O método numérico utilizado no desenvolvimento do presente trabalho, necessita de dois domínios: físico e espectral. Isto porque a metodologia IMERSEPEC realiza a transformada de Fourier, para todos os termos das, Eq. 1, Eq. 2 e Eq. 3, o que resulta na Eq. 4 e Eq. 5, esta metodologia está bem detalhada nos trabalhos de Nascimento (2016) e Mariano (2011).

$$ik_j \hat{u}_i = 0, \quad (4)$$

$$[\frac{\partial}{\partial t} + vk^2] \hat{u}_i(\vec{k}, t) = \wp_{im} [f_m(\vec{k}, t) - ik_j \int_{\vec{k}=\vec{r}+\vec{s}} \hat{u}_m(\vec{r}, t) \hat{u}_j(\vec{k}-\vec{r}, t) d\vec{r}], \quad (5)$$

sendo,  $\vec{k}$  o vetor número de onda,  $\hat{u}_i$  é o campo de velocidade transformado,  $\vec{r}$  e  $\vec{s}$  representam matematicamente a relação entre os vetores número de onda; e  $\wp_{im}$  representa um tensor projeção, responsável por projetar os vetores sobre o plano de divergência nula, denominado de plano  $\pi$ . Este plano é definido pelos vetores da equação de conservação da massa transformado (MARIANO, 2011 *apud* SILVEIRA-NETO, 2002, p. 46). Na Eq. (5), nota-se que a pressão foi desacoplada da equação, isso ocorre devido a projeção de cada termo da Eq. (2) e Eq. (3) no plano  $\pi$  (BRIGGS; HENSON, 1995).

O método da fronteira imersa utilizada é o *multidirecting forcing*. Nesta metodologia, a força é imposta diretamente nos pontos lagrangianos. Devido a geometria estudada ser uma geometria complexa, fez necessário o uso de uma função interpolação e distribuição, Eq. (6), na qual utilizou a função peso  $W_c$ , Eq. (7), função cúbica, (Nascimento, 2016).

$$D_h(\vec{x} - \vec{X}) = \frac{1}{h} W_c(r_x) W_c(r_y), \quad (6)$$

$$W_c(r) = \{1 - \frac{1}{2} |r| - |r|^2 + \frac{1}{2} |r|^3 \text{ se } 0 \leq |r| \leq 1 \quad 1 - \frac{1}{6} |r| + |r|^2 - \frac{1}{6} |r|^3 \text{ se } 1 \leq |r| \leq 2 \quad 0 \text{ se } |r| > 2\} \quad (7)$$

O método de avanço temporal utilizado, é o método de Runge-Kutta 4º ordem 6 passos, (Mariano, 2011; Nascimento, 2016). O incremento temporal utilizado, avanço temporal, Eq. 8, 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.

$$\Delta t = CFL * \min \left[ \min \left[ \frac{\Delta x}{\max[|u|]}, \frac{\Delta x}{\max[|v|]} \right]; \frac{2}{v} \left( \frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} \right) \right]. \quad (8)$$

Os valores obtidos serão apresentados com base no coeficiente de sustentação ( $Cl$ ), Eq. 9 e coeficiente de arrasto ( $Cd$ ), Eq. 10.

$$Cl = \frac{2F_{c_y}}{\rho A U_{\infty}^2}, \quad (9)$$

$$Cd = \frac{2F_{c_x}}{\rho A U_{\infty}^2}, \quad (10)$$

onde,  $F_{c_y}$  e  $F_{c_x}$ , são as forças globais que um fluido faz sobre o corpo, calculadas através de um somatório,  $A$  é a área transversal vista pelo escoamento da interface imersa sobre o plano normal do escoamento,  $U_{\infty}$  é a velocidade do perfil uniforme na entrada.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com essa metodologia foram encontrados resultados numéricos e visuais, que puderam ser comparados com os trabalhos de Sarvghad-Moghaddam *et al.* (2011) e Ding *et al.* (2006).

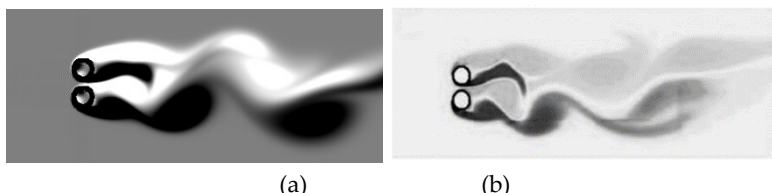
Na Tab. 2, têm-se os resultados para um  $Re=100$ , e na Fig. 2, se apresenta uma imagem na esteira de vórtices jusante aos cilindros.

Tabela 2 - Coeficientes de arrasto e sustentação para  $Re=100$

	Presente trabalho		Ding <i>et al.</i> (2006)	
	$Cd$	$Cl$	$Cd$	$Cl$
Cilindro Superior	1,53	-0,48	1,53	-0,46
Cilindro Inferior	1,53	0,48	1,51	0,47

Fonte: o autor.



Figura 2 - Esteira de vórtices para  $Re=100$ ; (a) Autor e (b) Sarvghad-Moghaddam *et al.*

Fonte: (a) o autor; (b) SARVGHAD-MOGHADDAM *et al.* (2011).

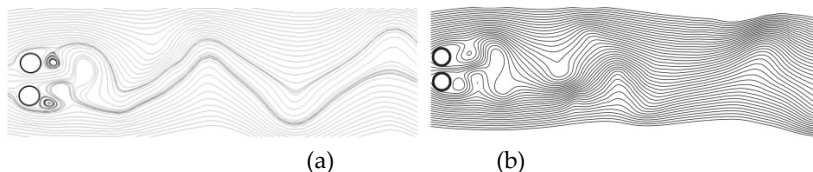
Nota-se da Fig. 2 que a esteira de vórtices não gera nenhuma configuração estável para o desprendimento dos vórtices, e também as estruturas apresentadas pelos autores possuem conformidade com a referência, mostrando duas estruturas com rotação anti-horária, de coloração preta, de dimensões grandes e uma composição de duas estruturas turbilhonares em sentido horário formando uma estrutura única.

Para um  $Re=200$ , foram encontrados os resultados da Tab. 3, e uma comparação das linhas de corrente do escoamento com a de referência, Fig. 3.

Tabela 3 - Coeficientes de arrasto e sustentação para  $Re=200$ 

	Presente trabalho		Ding <i>et al.</i> (2006)	
	$C_d$	$C_l$	$C_d$	$C_l$
Cilindro Superior	1,52	-0,45	1,54	-0,41
Cilindro Inferior	1,54	0,44	1,52	0,43

Fonte: o autor.

Figura 3 - Linhas de corrente para o escoamento de  $Re=200$ ; (a) Autor e (b) Ding *et al.*

Fonte: (a) o autor; (b) DING *et al.* (2006).

Na Fig. 3a as linhas de corrente obtidas pelo presente trabalho e na Fig. 3b as linhas de corrente para o escoamento obtidas por

Ding *et al.* (2006). Analisando qualitativamente observa-se que o escoamento apresenta as mesmas características, isto é, com a existência de estruturas turbilhonares contra-rotativas a jusante do cilindro e além de evidenciar que o espaço entre os cilindros se caracteriza como um jato, que energiza o escoamento e as estruturas formadas.

Tanto na Tab. 2 quanto na Tab. 3, apresentou-se um valor negativo para o Coeficiente de sustentação do Cilindro superior, isso se dá pela tendência do cilindro superior se aproximar do inferior.

#### 4. CONCLUSÕES

Portanto, conclui-se a utilização da metodologia IMERSPEC, o qual utiliza o Método Pseudoespectral de Fourier, acoplado ao Método da Fronteira Imersa, apresenta resultados bem próximo aos obtidos pela referência, possibilitando a validação do código para o caso de escoamento de dois cilindros rígidos e fixos posicionados lado a lado. O resultado também possibilitou o entendimento e compreensão da física envolvida no problema.

Para a distância de  $1,5D$  entre cilindros foi observado que não há uma liberação estável de vórtices, não sendo possível caracterizar, o par sendo fisicamente único, assim os coeficientes apresentam valores muito irregulares, por todo o tempo de escoamento.

A mudança do Número de Reynolds, não causou uma mudança considerável no coeficiente de arrasto, enquanto que no coeficiente de sustentação teve uma mudança maior.

#### 5. 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.

DING, H. *et al.* Numerical simulation of flows around two circular cylinders by mesh-free least square-base finite difference methos. **International Journal for Numerical Methods in Fluids**, v. 53, n. 1, p. 305-332, 2006.

LEE, K.; YANG, K.; YOON, D. Flow-induced forces on two circular cylinders in proximity. **Computers & fluids**, v. 38, n. 1, p. 111-120, 2009.

MARIANO, F. **Soluções numéricas de Navier-Stokes utilizando uma hibridação das metodologias Fronteira Imersa e Pseudoespectral de Fourier**. 2011. 177 f. Tese (Doutorado em Engenharias) – 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. 189 f. Tese (Doutorado em Engenharias) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2016.

SARVGHAD-MOGHADDAM, H.; NOOREDIN, N.; GHADIRI-DEHKORDI, B. Numerical simulation of flow over two side-by-side circular cylinders. **Journal of Hydrodynamics**, v. 23, n. 6, p. 792-805, 2011.

SILVEIRA-NETO, A. **Turbulência nos fluidos aplicada**. Uberlândia: UFU, 2002. Apostila da Disciplina Mecânica dos Fluidos do Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal de Uberlândia.

# ANÁLISE MICROESTRUTURAL DE REVESTIMENTO DURO APLICADOS PELO PROCESSO FCAW COM ADIÇÃO DE ARAME NÃO ENERGIZADO PARA DIFERENTES COMBINAÇÕES

Vitória Ferreira de Oliveira Marques<sup>1</sup> (marques\_vitoria@discente.ufg.br)

Valtair Antônio Ferraresi<sup>1</sup> (valtair@ufu.br)

Daniel Souza<sup>1</sup> (daniel.souza@ufg.br)

<sup>1</sup>Universidade Federal de Goiás, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

**Resumo:** Durante o processo produtivo as facas picadoras nas usinas de cana-de-açúcar sofrem elevado desgaste abrasivos que resultam em paradas das máquinas para reposição das mesmas, o processo de revestimento duro aplicado por soldagem aumenta a vida desses componentes. Novas técnicas de soldagem e novos tipos de consumíveis têm sido desenvolvidos para minimizar este tipo de desgaste, entre eles está a adição de nióbio e titânio ao metal de adição mais utilizado, que é o consumível a base de FeCrC. Alguns estudos também foram feitos analisando a viabilidade do processo de soldagem arame tubular (FCAW) duplo arame com adição de arame não energizado no processo de revestimento duro, com intuito de melhorar o processo e reduzir custos. O objetivo deste trabalho é avaliar a microestrutura dos revestimentos duros e analisar a influência destas nas características do revestimento. Para realização do trabalho foram feitos revestimentos duros aplicados pelo processo de soldagem FCAW duplo arame, sendo um dos arames não energizado. Para isso foram utilizados três tipos de consumíveis: FeCrC, FeCrC+Ti e FeCrC+Nb com diâmetro de 1,6 mm, em três condições de revestimento diferentes. Os revestimentos por soldagem foram feitos em uma chapa de aço carbono SAE 1045. Foram retiradas e

preparadas amostras para avaliação microestrutural. A avaliação preliminar da microestrutura indica modificação na morfologia, tipo e quantidade de precipitados.

**Palavras-chave:** revestimento duro; microestrutura; FCAW duplo arame.

## 1. INTRODUÇÃO

Vários equipamentos em usina de açúcar e destilaria de álcool apresentam condições críticas do ponto de vista de desgaste abrasivo, dentre eles destacam-se as facas picadoras, os martelos desfibradores e as moendas. Esses equipamentos são recuperados por soldagem (durante as paradas de manutenção) pela aplicação de revestimentos duros, utilizando-se diferentes processos, técnicas e consumíveis para a reposição do metal desgastado em serviço. As facas picadoras sofrem, além do desgaste abrasivo, cargas cíclicas devido ao seu impacto sobre a cana-de-açúcar e sobre o equipamento que são presas.

Tradicionalmente, a aplicação de revestimentos duros pelo setor industrial tem sido realizada manualmente com o processo Eletrodo Revestido ou de forma automática com o processo Arco Submerso, quando a geometria ou dimensões da peça se adequam a essa aplicação. Devido à sua maior produtividade em relação ao primeiro, aliada à maior versatilidade quando comparado ao segundo, o processo Arame Tubular, também designado como FCAW (Flux Cored Arc Welding), tem se tornado uma alternativa importante, contando com uma grande variedade de consumíveis para diferentes aplicações de revestimentos duros (LIMA, 2008).

Durante o período entre safra, que corresponde ao período entre os meses de novembro a março, as usinas sucroalcooleiras desmontam os equipamentos para realizarem a manutenção geral dos mesmos. Dentre esses equipamentos, 70% são recupe-

rados por soldagem através de diferentes procedimentos (SANTOS *et al.*, 2005). Segundo Bessa (2018) a soldagem de manutenção tem o objetivo de manter em funcionamento as linhas de produção promovendo uma recuperação rápida e de baixo custo para a peça ou equipamento.

O desgaste abrasivo na tribologia é o processo pelo qual o movimento relativo entre duas superfícies em contato, produz a deterioração em uma das faces devido as protuberâncias presentes nelas, ou quando partículas duras estão entre as superfícies somando para um maior índice de remoção de material das mesmas (ASTM G40, 1992).

Dureza e resistência ao desgaste são duas propriedades importantes no processo de melhoria da vida útil dos equipamentos, entretanto, Lima (2008) afirma que não é necessariamente a dureza, mas a microestrutura que administra diretamente as propriedades de resistência ao desgaste.

A alta demanda por revestimentos que atendam às mais diversas solicitações no campo tem resultado em uma enorme variedade de ligas. As principais condições para a seleção de uma liga para revestimento são primeiramente ordenadas pelo tipo de desgaste que o componente de trabalho será exposto e solicitado e, finalmente, pelos custos envolvidos no contexto. É importante também considerar o metal base que irá receber o revestimento, a resistência ao impacto, a temperatura de trabalho do componente revestido e os fatores que podem influenciar a corrosão (ZIEDAS; TATINI, 1997; LIU *et al.*, 2015).

A soldagem FCAW com dois arames (Duplo Arame) é uma variante do processo FCAW convencional e caracteriza-se pela formação de um par de arcos elétricos entre uma única poça de fusão e dois eletrodos consumíveis continuamente alimentados. Segundo Scotti e Ponomarev (2008), esse processo permite maior

taxa de deposição de material, possibilidade de soldagem com velocidades mais elevadas e menor aporte térmico sobre a peça. A adição de arame não energizado, também chamado como arame frio, no processo FCAW duplo arame tem como objetivo agregar todas as qualidades do processo FCAW duplo arame, aumentando a produtividade e a taxa de deposição sem elevar o custo do processo.

Lima (2008) analisou a microestrutura de revestimentos feitos pelo processo FCAW simples utilizando três tipos de consumíveis a base de FeCrC, sendo que um não havia adição de elemento de liga e os outros dois, um com adição de Nb e o outro com adição de Ti. No revestimento a base de FeCrC sem adição de elemento de liga ele observou a presença de carbonetos ( $M_7C_3$ ). Para o revestimento que utilizou FeCrC com adição de Nb observou a presença dos mesmos carbonetos e além destes, a presença de carbonetos de nióbio (NbC) e, para o revestimento utilizando FeCrC com adição de titânio ele também observou carbonetos  $M_7C_3$ , além da presença de carbonetos de Titânio (TiC).

O objetivo desta pesquisa é avaliar a técnica de aplicação de revestimento duro em chapas de aço carbono utilizando o processo de soldagem FCAW (Flux Cored Arc Welding) com e sem a injeção de arame maciço não energizado acoplado a tocha. Além disso, pretende-se verificar os efeitos da microestrutura (matriz) e dos tipos, formatos, tamanho e distribuição dos carbonetos na resistência ao desgaste.

## 2. METODOLOGIA

Foram escolhidos para o estudo três arames tubulares autoprotetidos de 1,6 mm de diâmetro, a composição química encontra-se na Tabela 1 retirada de catálogo da empresa fabricante UTP.

A diferença entre os arames é determinada pela diferença nos teores de carbono, silício, manganês, cromo, pela adição de nióbio no segundo arame e pela adição de molibdênio e titânio no último. O arame FeCrC foi utilizado como o arame base para o revestimento, sendo este o arame energizado utilizado para os experimentos e os arames FeCrC+Nb e FeCrC+Ti foram adicionados não energizados (frio) no processo de soldagem.

Os revestimentos foram realizados no robô YASKAWA MOTOMAN HP20 utilizando o processo de soldagem Arame Tubular (FCAW) e Arame Tubular duplo arame, com adição de arame não energizado, posição plana. Em ambos os processos a tocha se encontra na vertical formando um ângulo de 90° com a superfície da chapa. Nos testes em que houve adição de arame não energizado, foi acoplado um suporte em posição longitudinal à tocha na direção da velocidade de soldagem em que ambos os arames são alimentados um a frente do outro. O arame não energizado é alimentado formando um ângulo de 35° com a horizontal. Este ângulo foi o que permitiu melhor disposição para montagem e para a realização dos revestimentos.

Para definir os parâmetros de soldagem ideais, primeiramente foram realizados testes sem adição de arame energizado para encontrar os parâmetros ideais, utilizando o arame de FeCrC. Depois foram feitos testes com as adições dos arames FeCrC+Nb e FeCrC+Ti, para definição dos parâmetros para o procedimento com adição de arame não energizado. Os parâmetros de soldagem utilizados para realização dos revestimentos estão na Tabela 2.



Tabela 1 - Composição química dos arames tubulares autoprotégidos fornecidos pelo fabricante UTP

Arame Tubular	Classificação DIN 8555	Porcentagem em peso (%)							Dureza após a soldagem de três camadas (HRC)
		C	Si	Mn	Cr	Mo	Nb	Ti	
FeCrC	MF 10-GF-60-GR	4,4	0,3	0,3	27,0	-	-	-	57 - 62
FeCrC+Nb	MF 10-GF-65-GRI	5,5	0,3	0,3	22,0	-	7,0	-	63-65
FeCrC+Ti	MF 10-G-GF-60-GP	1,8	0,2	0,9	6,1	1,4	-	5,5	58

Fonte: Adaptado de UTP (2022).

Tabela 2 - Parâmetros de revestimentos selecionados após os testes preliminares e valores de tensão e corrente de soldagem monitorados

CONDIÇÃO	Ur (V)	Valim arame energizado (m/min)	Valim arame não energizado (m/min)	DBCP (mm)	Vsold (cm/min)	Um (V)	Im (A)
FeCrC	42	8	-	22	30	43,6	250
FeCrC + FeCrCNb	42	8	4	22	30	41,6	276
FeCrC + FeCrCTi	42	8	4	22	30	41,4	267,2

Ur = tensão de referência; Valim = velocidade de alimentação; DBCP = distância bico de contato-peça; Vsold = velocidade de soldagem.

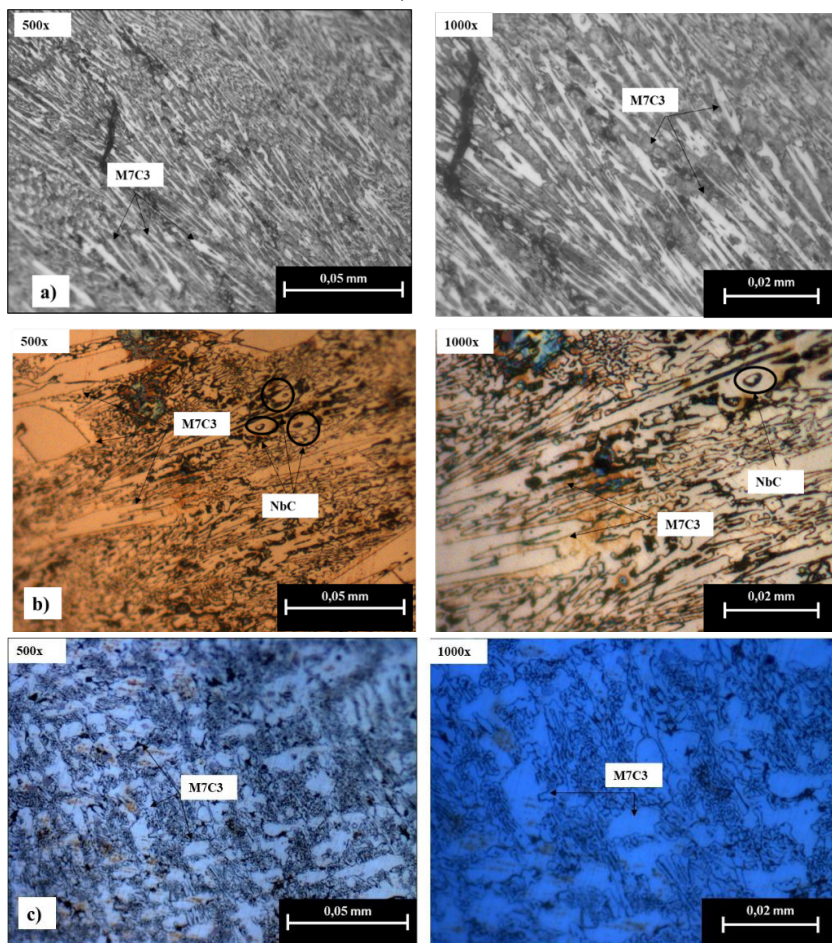
Fonte: o autor.

Os revestimentos foram feitos em chapas de aço ABNT 1045 com dimensões de 400x400x200 mm e, para as três condições (FeCrC; FeCrC – FeCrC+Nb não energizado e FeCrC – FeCrC+Ti não energizado), foram feitos 6 cordões de solda de 300 mm. Foram extraídas três amostras para análise microestrutural, as quais foram lixadas de acordo e polidas com pasta de diamante de 1 µm. Posteriormente foram atacadas com Água Régia em Álcool por 15 s e levadas ao microscópio óptico para revelação da microestrutura. Para a avaliação microestrutural foram extraídas amostras das chapas soldadas para as 3 condições de revestimento feitas até o momento. Foram tiradas as microestruturas da região entre dois revestimentos.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 mostra a microestrutura para as três condições de revestimento (FeCrC, FeCrC- FeCrC+Nb e FeCrC – FeCrC+Ti) na região entre dois revestimentos com duas ampliações.

Figura 1 - Microestruturas dos revestimentos feito com as condições: a) FeCrC; b) FeCrC – FeCrC+Nb e c) FeCrC- FeCrC+Ti



Fonte: o autor.

Comparando as imagens com as microestruturas obtidas por Souza (2015) percebe-se a formação de camadas compostas por carbonetos hexagonais primários ( $M_7C_3$ ), este fato também é observado por Lima (2008). Para a condição FeCrC- FeCrC+Nb pode-se perceber a presença de carbonetos de Nióbio, também encontrados nos trabalhos citados. Para o revestimento com FeCrC – FeCrC+Ti foram encontrados carbonetos de Titânio no trabalho de Souza (2015), porém não foi tão visível nas imagens, podendo ser necessário uma análise melhor dessa condição.

#### 4. CONCLUSÕES

Para as três condições apresentadas pode-se observar que:

- Revestimento FeCrC: Presença de carbonetos  $M_7C_3$ ;
- Revestimento FeCrC – FeCrC+Nb: Presença de carbonetos  $M_7C_3$  e carbonetos de nióbio (NbC);
- Revestimento FeCrC – FeCrC+Ti: Presença de carbonetos  $M_7C_3$  e não foi possível a visualização clara de carbonetos de titânio.

O processo FCAW duplo arame com adição de arame não-energizado obteve microestruturas parecidas com o processo FCAW simples utilizado por Lima (2008).

#### 5. AGRADECIMENTOS

Agradeço à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG) pela bolsa concedida para realização dos estudos.

#### REFERÊNCIAS

ASTM G40-09. **Standard Terminology Relating to Wear and Erosion**. Pennsylvania: 1992.

BESSA, P. C. Soldagem de manutenção: fundamentos e equipamentos utilizados. **Alusolda**, 5 fev. 2018. Disponível em: <https://alusolda.com>.

br/soldagem-de-manutencao-fundamentos-e-equipamentos-utilizados. Acesso em: nov. 2022.

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. 262 f. Tese (Doutorado em Engenharias) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008.

LIU, J.; YANG, S.; XIA, W.; JIANG, X.; GUI, C. Microstructure and wear resistance performance of CuNiMn alloy based hardfacing coatings reinforced by WC particles. **Journal of Alloys and Compounds**, Wuhan, 2015.

SANTOS, A. S. *et al.* Soldagem na Indústria Sucroalcooleira. **Revista da Soldagem**, ano I, n. 7, p. 20-26, 2005.

SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. **Soldagem MIG/MAG.** São Paulo: ArtLiber, 2008.

SOUZA, D. D. B. G. de. **Aplicação de revestimento duro utilizando processo FCAW duplo arame para diferentes tipos de consumíveis.** 2015. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharias) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2015.

UTP. **Consumíveis para Manutenção e Reparo.** São Paulo: voestalpine Böhler Welding, 2022. Disponível em: <https://www.kezverchile.cl/wp-content/uploads/2018/09/Catalogo-Soldaduras-UTP-kezver-chile.pdf>. Acesso em: 02 dez. 2022.

ZIEDAS, S.; TATINI, I. **Soldagem.** São Paulo: Editora SENAI, 1997. (Coleção Tecnologia SENAI).

# INFLUÊNCIA DA TENSÃO NA REGULARIDADE DO PROCESSO MIG/MAG POR CURTO-CIRCUITO

Weslei Rodrigues Niz<sup>1</sup> (niz\_weslei@discente.ufg.br)

Daniel Souza<sup>1</sup> (daniel.souza@ufg.br)

Demostenes Ferreira Filho<sup>1</sup> (demostenesferreira@ufg.br)

<sup>1</sup>Universidade Federal de Goiás, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

**Resumo:** O presente trabalho tem como objetivo avaliar a influência da variação da tensão na regularidade do processo MIG/MAG por curto-circuito. A metodologia utilizada foi a de se variar o ajuste na fonte da e tensão de soldagem, para três gases de proteção com diferentes teores de CO<sub>2</sub>, mantendo-se o valor da velocidade de alimentação de arame e ajuste do efeito indutivo constantes. Para avaliar a regularidade do processo foi utilizado o Critério Laprosolda de Regularidade, que consiste no índice Vilarinho de regularidade bem como o cálculo da frequência de corte. Utilizando 100% Ar o processo operou mais regular entre os valores de 20 V a 17 V para Ar puro, de 21 V a 19 V para Ar + 25% de CO<sub>2</sub> e de 24 V a 22 V para CO<sub>2</sub>.

**Palavras-chave:** indutância; curto-circuito; soldagem MIG/MAG; regularidade.

## 1. INTRODUÇÃO

Soldagem MIG/MAG é um processo de fabricação muito utilizado na indústria, com uma ampla gama de implementações, pode ser utilizado na união de chapas pequenas e na montagem de grandes estruturas. Neste processo de soldagem é utilizado um gás, que pode ser ativo ou inerte, como proteção do cordão de solda contra os gases da atmosfera. O eletrodo, na forma de arame, é adicionado de forma contínua e suas principais formas de operação são por goticular (spray), globular e por curto-circuito. O modo curto-circuito será abordado neste trabalho.

Na transferência por curto-circuito a gota de metal fundido na ponta do arame eletrodo encosta na poça de soldagem, transferindo metal para poça por tensão superficial e causando um curto-circuito. Durante o curto há uma subida brusca da corrente ocasionando o rompimento do arame, por efeito pinch, e a reabertura do arco. Por operar com baixa energia de soldagem, o modo curto-circuito é muito utilizado para chapas finas e soldagem na posição sobrecabeça.

Os principais parâmetros que influenciam a soldagem no modo curto-circuito são o gás de proteção, a tensão e a corrente de soldagem. A indutância, taxa de crescimento da corrente durante o curto-circuito, é de interesse apenas para soldagens feitas por curto-circuito e apesar de sua influência na qualidade do cordão ser conhecida na literatura, é pouco considerada na indústria. Trabalhos anteriores mostram a importância da indutância na regularidade do processo operando em curto-circuito (BULLE, 2017; REZENDE *et al.*, 2011; SOUZA *et al.*, 2011).

Neste trabalho estes fatores serão avaliados para determinar a melhor condição de regularidade de transferência metálica, essa resposta será avaliada utilizando o índice de Vilarinho de regu-

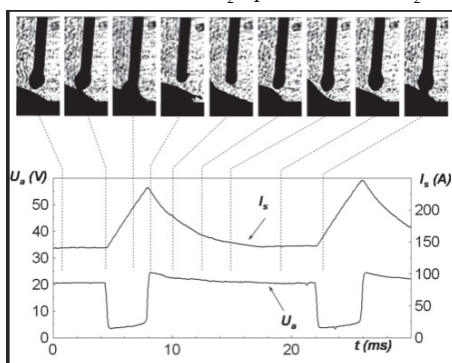
laridade de transferência (SOUZA *et al.*, 2009; REZENDE *et al.*, 2011). Com melhor regularidade tem-se melhor condição para transferência de material, melhor qualidade do cordão e menor quantidade de respingos.

Por fim, o objetivo deste trabalho é aprimorar o entendimento de como a variação da taxa de subida da corrente durante o curto-circuito afeta a regularidade do processo levando em consideração a tensão de soldagem e o teor de CO<sub>2</sub> no gás de proteção.

### 1.1 Transferência por curto-circuito

Transferência por curto-circuito é o modo de transferência metálica que ocorre quando a ponta líquida do arame-eletrodo toca a poça de fusão e o metal da ponta é transferido para a poça. A frequência de transferência por curto-circuito é de 20 a 200 vezes por segundo (SCOTTI; PONOMAREV, 2008), seguindo as etapas mostradas na Fig. 1.

Figura 1 - Relação entre a frequência e a taxa de subida da corrente para 100% de Ar, para Ar mais 25% de CO<sub>2</sub> e para 100% de CO<sub>2</sub>



Fonte: SCOTTI; PONOMAREV (2008).

Primeiro há o estágio de crescimento da gota na ponta do arame. Nesse estágio que se segue após o rompimento do curto-circuito, o tamanho do arco cresce rapidamente e segundo Scotti

e Ponomarev (2008). Em seguida a gota toca a poça de fusão fazendo a tensão cair bruscamente e subir a corrente, curto-circuito. Nesse instante a principal força que age sobre a gota é a tensão superficial, além do efeito Pinch. A gota começa a ser transferida por tensão superficial e a ponte formada entre a gota e a poça começa a se romper ao final do curto-circuito. Com o aumento da corrente e diminuição da seção transversal aumenta também o efeito pinch (CAMARGO *et al.*, 2016).

O ponto onde a corrente chega ao maior valor, ocorre o rompimento da ponte metálica e queda da corrente. Após a formação do arco a tensão e corrente voltam a valores de regime e começa a formação de uma nova gota de solda com o arco aberto.

## 1.2 Gases de proteção

Gases de proteção são gases injetados na região da soldagem com a função de proteger a solda contra o ar atmosférico além de estabilizar o arco de soldagem, podendo influenciar na geometria e qualidade da solda (FERNANDES *et al.*, 2010). As propriedades básicas dos gases de proteção são o potencial de ionização, condutividade térmica, dissociação e recombinação, potencial de oxidação e a densidade do gás.

Os gases de proteção são classificados como inertes e ativos. Os gases inertes não reagem quimicamente com o metal de solda, sendo o argônio e hélio os mais comercialmente usados, gases que apresentam reatividade com o metal de solda são classificados como ativos, sendo o  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$  os mais utilizados.

Uma propriedade do gás que é importante para a soldagem é a sua densidade relativa à densidade da atmosfera. Gases, ou misturas, mais densas têm maior facilidade de proteger a solda feita na posição plana, sendo necessário utilizar uma maior vazão para gases de densidades mais baixas, como o hélio. Essa condição se



inverte para soldagens feitas fora da posição plana, na posição sobrecabeça quanto menor a densidade maior será a eficiência de proteção. Nas posições horizontais e verticais a densidade não favorece a proteção, sendo recomendado aumentar a vazão um pouco acima do recomendado (TATAGIBA *et al.*, 2012).

A estabilidade de arco também é função dos gases de proteção e está vinculada às propriedades físico-químicas dos gases, como a condutividade térmica, potencial de oxidação e potencial de ionização. O potencial de ionização é a energia necessária para retirar um ou mais elétrons da camada de valência do átomo, tornando-o ionizado, um gás ionizado conduz eletricidade. Esta propriedade influencia tanto a abertura do arco quanto a estabilidade (GUAN *et al.*, 2019). O gás argônio, com baixo potencial de ionização, apresenta maior facilidade para abertura do arco e maior estabilidade do que o hélio, maior potencial de ionização.

### 1.3 Tensão e corrente de soldagem

Tensão de soldagem, velocidade de alimentação do arame eletrodo, corrente de soldagem, velocidade de soldagem e vazão de gás de proteção são os principais parâmetros da soldagem, seus ajustes adequados proporcionam uma solda com qualidade. A tensão e a corrente de soldagem, além de suas principais funções influenciam a maior parte das peculiaridades do processo, soldagem com fontes tradicionais tipo tensão constante, a variação da tensão implica na variação do tamanho do arco e a corrente de soldagem está atrelada a velocidade de alimentação do arame.

### 1.4 Critério de Estabilidade Laprosolda/UFG

O “Critério Laprosolda para Qualificar a Estabilidade de Transferência por Curto-circuito no Processo de Soldagem MIG/MAG”, se baseia na premissa de que a estabilidade da transferência por curto-circuito está ligada com a regularidade

dos tempos em curto-circuito e em arco aberto, bem como no volume adequado que cada gota deve alcançar para haver a transferência por tensão superficial. Duarte (2017) e Souza *et al.*, (2009) propõem rotinas computacionais para fazer análises nos sinais de soldagem MIG/MAG por curto-circuito utilizando o critério Laprosolda.

Com tempos em curto-circuito e tempos em arco aberto sempre constantes, a transferência estará no mais alto grau de regularidade. O índice proposto para quantificar esta regularidade é o Índice Villarinho de Regularidade de Transferência (IV<sub>cc</sub>), Equação 1, quanto menor o seu valor mais regular é a transferência:

$$IV_{cc} = \sigma_{tcc}/t_{cc} + \sigma_{tab}/t_{ab}, \quad (1)$$

onde  $\sigma_{tcc}$ =desvio padrão da média do tempo de curto-circuito;  $\sigma_{tab}$ =desvio padrão da média do tempo de arco aberto,  $t_{cc}$ =média do tempo de curto-circuito;  $t_{ab}$ =média de tempo aberto de arco aberto.

Pode-se ser determinada uma faixa de frequência de transferência calculada, a partir da velocidade de alimentação, diâmetro e densidade do arame, para atingir o tamanho de gota para uma transferência adequada, conforme a Equação 2 abaixo:

$$F_{cc} = Valim \cdot d / (\Phi_g)^3, \quad (2)$$

onde  $d$  = diâmetro do arame-eletrodo em milímetros;  $Valim$ = velocidade de alimentação de arame em milímetros por segundo,  $\Phi_g$ =valores máximos e mínimos de diâmetro adequado da gota em mm,  $F_{cc}$ =frequência de curto-circuito em Hz calculada para o valor máximo e o mínimo de diâmetro adequado da gota.

Os resultados de Rezende *et al.* (2011) reforçaram a premissa do Critério de Estabilidade Laprosolda, onde a estabilidade

pode ser medida pelo índice Vilarinho, desde que aplicado uma restrição baseada em um corte pelo afastamento do tamanho adequado das gotas.

## 2. METODOLOGIA

Os experimentos foram feitos utilizando o robô ligado à fonte, com o valor para a distância de bico à peça (DBCP) de 12 mm, medido com um paquímetro. Durante os experimentos foram coletados os dados da tensão e corrente de soldagem, bem como a velocidade de alimentação do arame eletrodo.

Todos os testes foram realizados na posição plana com cordão sobre chapa. Testes preliminares foram realizados para determinar a tensão e a velocidade de alimentação em que a transferência ocorria por curto-circuito, todos os comprimentos de arco foram similares e determinados visualmente.

Os dados coletados foram analisados utilizando um programa implementado em Python. Os programas utilizaram os dados de tensão e corrente durante o experimento para calcular dados relativos à soldagem, como tempo de arco aberto e tempo de curto-circuito.

Sabendo-se quais os valores de taxa de subida da corrente proporcionam maior regularidade para o processo, este foi fixado e a tensão de operação foi variada de valores altos (próximos à transferência no modo globular/curto-circuito) até valores muito baixos onde a operação fica visivelmente irregular, como visto na Tab. 1. Avaliando os dados coletados foi possível determinar uma faixa de valores para a tensão de operação onde tinha-se melhor regularidade.

Tabela 1 - Valores utilizados para fazer o experimento

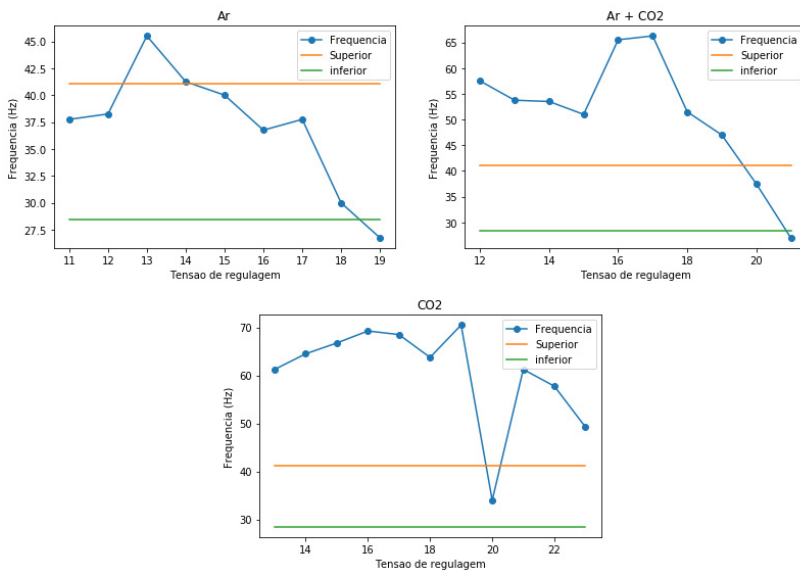
100% Ar			Ar + 25% CO <sub>2</sub>			100% CO <sub>2</sub>		
Ks-125			Ks-100			Ks-120		
19 V	15 V	11 V	21 V	17 V	13 V	22 V	18 V	14 V
18 V	14 V	10 V	20 V	16 V	12 V	21 V	17 V	13 V
17 V	13 V		19 V	15 V	11 V	20 V	16 V	12 V
16 V	12 V		18 V	14 V	10 V	19 V	15 V	11 V

Fonte: o autor.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para o 100% Ar considerou-se a faixa valores de taxa de subida da corrente de 50 a 150 A/ms como valores de melhor regularidade; para Ar + 25%CO<sub>2</sub> considerou-se a faixa valores de taxa de subida da corrente entre 90 a 150 A/ms; para 100% CO<sub>2</sub> entre 90 a 120 A/ms, os valores escolhidos para realizar os experimentos variando a tensão de regulagem foram 125 A/ms para Ar, 120 A/ms Ar + 25% de CO<sub>2</sub> e 100 A/ms para CO<sub>2</sub> puro.

Figura 2 - Relação entre a frequência e a taxa de subida da corrente para 100% de Ar, para Ar mais 25% de CO<sub>2</sub> e para 100% de CO<sub>2</sub>



Fonte: o autor.

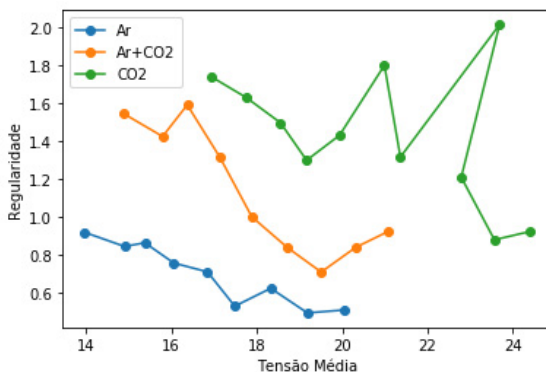
Os gráficos da Figura 2 mostram os gráficos de frequência curto-circuito em função da tensão regulada de soldagem e os valores de frequência de corte superior e inferior para esses experimentos.

A Figura 3 mostra os gráficos de regularidade com a tensão média de soldagem, com isso é possível precisar uma faixa de valores ótimos para a tensão de soldagem para cada gás. Há uma tendência do aumento dos valores de tensão de soldagem diminuir a regularidade do processo independente do gás de proteção e o aumento da quantidade de  $\text{CO}_2$  diminuir a regularidade do processo, em conformidade com os resultados mostrados por Liskevych e Scotti (2015).

As faixas de valores para as tensões de soldagem com melhores regularidades foram, de 20 V a 17 V para Ar puro, de 21 V a 19 V para Ar + 25% de  $\text{CO}_2$  e de 24 V a 22 V para  $\text{CO}_2$ , tais resultados reiteram os achados por Silva (2020).

Tais resultados apontam para uma possível relação entre o tamanho do arco e a regularidade, pois uma maior quantidade de  $\text{CO}_2$  está relacionada à diminuição do arco de soldagem, como mostrado por Lohse *et al.* (2020).

Figura 3 - Gráfico da regularidade pela tensão real de soldagem para 100% de Ar, para Ar mais 25% de  $\text{CO}_2$  e para 100%  $\text{CO}_2$



## 4. CONCLUSÕES

Para os ensaios preliminares realizados até o momento, pode-se concluir que:

- Com o aumento de CO<sub>2</sub> na mistura gasosa demandou também um aumento na tensão de regulagem;
- A faixa de valores para a tensão de soldagem para qual os valores de regularidade foram melhores são: de 20 V a 17 V para Ar puro, de 21 V a 19 V para Ar + 25% de CO<sub>2</sub> e de 24 V a 22 V para CO<sub>2</sub>;
- As soldagens feitas com 100% Ar tiveram melhores valores de regularidade se comparadas com as outras misturas de gases para a mesma tensão;

## 5. AGRADECIMENTOS

Agradeço aos professores Daniel e Demostenes pelas explicações e pela orientação. Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) pela bolsa concedida durante os anos do curso.

## REFERÊNCIAS

BULLÉ, J. V.; GUTIERRES, A.; SOUZA, D. Influência da taxa de subida da corrente na geometria do cordão de solda em função do gás de proteção em soldagens MIG/MAG por curto-circuito. *In: MOSTRA DE PRODUÇÃO UNIVERSITÁRIA - MPU*, 16., 2017, Rio Grande. **Anais [...]**. Rio Grande: Universidade Federal do Rio Grande, 2017.

CAMARGO, L. G.; DRECHSLER, M. F.; SANTOS, C. M. Proposta e Análise de Dispositivo para Otimização do Destacamento da Gota na Soldagem MIG/MAG. **Soldagem & Inspeção**, v. 21, n. 1, p. 83-91, 2016.

DUARTE, V. S. **Desenvolvimento de ferramenta computacional para análise do sinal de solda em soldagens MIG/MAG por curto-circuito**. 2017. 43 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Juiz de Fora, 2017.

FERNANDES, D. B.; MENEZES JÚNIOR, L. C.; VILARINHO, L. O. Ensaio para medição de nível e alcance de respingos em soldagem MIG/MAG. **Soldagem & Inspeção**, v. 15, n. 2, p. 150-155, 2010.

GUAN, Z. Q.; ZHANG, H. X.; LIU, X. G. Effect of magnetic field frequency on the shape of GMAW welding arc and weld microstructure properties. **Materials Research Express**, v. 6, n. 8, 2019.

LISKEVYCH, O.; SCOTTI, A. Influence of the CO<sub>2</sub> content on operational performance of short-circuit GMAW. **Welding in the World**, v. 59, n. 2, p. 217-224, 2015.

REZENDE, G. M. C.; LISKEVYCH, O.; VILARINHO, L. O. Um critério para determinar a regulagem da tensão em soldagem MIG/MAG por curto-circuito. **Soldagem & Inspeção**, v. 16, n. 2, p. 98-103, 2011.

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

SILVA, J. G. F. **Estudo da influência do gás de proteção da soldagem MIG/MAG na resistência mecânica de uma junta**. 2020. 74 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) — Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2020.

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

SOUZA, D.; ROSSI, M. L.; KEOCHEGUERIAN, F. 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, 2011.

TATAGIBA, L. C. S.; GONÇALVES, R. B.; PARANHOS, R. Tendências no desenvolvimento de gases de proteção utilizados na soldagem MIG/MAG. **Soldagem & Inspeção**, v. 17, n. 3, p. 218-228, 2012.

LOHSE, M.; TRAUTMANN, M.; FÜSSEL, U. Influence of the CO<sub>2</sub> Content in Shielding Gas on the Temperature of the Shielding Gas Nozzle during GMAW Welding. **Journal of Manufacturing and Materials Processing**, v. 4, n. 4, p. 113, 2020.

# REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE MICROESTRUTURA DO REVESTIMENTO A BASE DE FeCrC DEPOSITADO PELO PROCESSO FCAW

Wesley Oliveira da Rocha<sup>1</sup> (wesleyrocha@discente.ufg.br)

Daniel Souza<sup>1</sup> (daniel.souza@ufg.br)

Alice Gonçalves Osorio<sup>2</sup> (osorio.alice@gmail.com)

<sup>1</sup>Universidade Federal de Goiás

<sup>2</sup>Universidade Federal de Pelotas

**Resumo:** Esse trabalho tem como objetivo fazer revisão bibliográfica sobre a microestrutura de revestimentos duros à base de FeCrC aplicados pelo processo de soldagem FCAW (Flux Core Arc Welding). Este revestimento tem como finalidade melhorar as propriedades da superfície desses metais, tais como, resistência à abrasão e dureza. A soldagem pode ser feita com mais de uma camada para melhorar as propriedades, isto se deve ao aumento de carbeto presente no material depositado. Esses carbeto formam estruturas fundamentais para as propriedades desejadas, exemplo do carboneto de cromo e, também, os elementos de ligas formadores de carbonetos primários como Nb, Ti e V. Neste estudo foi utilizada uma revisão sistemática com pesquisa primária em quatro bancos de dados filtrando com as palavras chaves hardfacing, FeCrC e FCAW, em seguida arquivados e feitos novos filtros com as palavras microestrutura e FeCrC.

**Palavras-chave:** revestimento duro; FCAW; microestrutura; carboneto; revisão bibliográfica.



## 1. INTRODUÇÃO

O processo de soldagem envolve vários fatores que influenciam significativamente na qualidade do cordão de solda, esses fatores podem ser estudados por várias análises, desde a preparação, pré-soldagem dos materiais, até o destino final da soldagem – pós-soldagem.

Para analisar um desses fatores, a soldagem pelo processo FCAW (*Flux Cored Arc Welding*) é muito utilizado na indústria para o reparo e fabricação de peças, tais como, facas de cortes, moedores, unha de retroescavadeira, entre outras. Este trabalho visa analisar a microestrutura formada nos revestimentos após a soldagem pelo processo FCAW na zona fundida do cordão de solda com arame eletrodo a base de FeCrC. Nesta zona tem formação dos carbeto. Nascimento e Pukasiewicz (2018) mostraram que os carbonetos são extremamente duros ultrapassando 600 HV, esses carbeto são preponderantes para o revestimento de elementos de máquinas que trabalham em regime severo com grande incidência desgaste por abrasão.

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

Revestimento duro – *hardfacing* – é utilizado para recuperação ou proteção das peças desgastadas pelo uso devido à perda de materiais, sendo a abrasão um dos desgastes mais significantes dessa perda de materiais, diante desse cenário, o revestimento por soldagem leva vantagem na recuperação das peças, pode reduzir o custo da manutenção, tempo de equipamentos parados e perda de produtividade (SOUSA *et al.*, 2021). De acordo com Padhiar e Vincent (2020), o desgaste é o principal fator que controla a vida útil das peças de máquinas, para atenuar isso, existem vários processos e, a soldagem é um deles; o cordão de

solda aplicado é mais duro que o material base, consegue-se melhoras significativas nas propriedades com o material de adição. Com aumento da eficiência junto com alta qualidade da solda, têm desenvolvido estudo de métodos e tecnologia de soldagem para atenuar os desgastes abrasivos que as peças sofrem quando submetidas ao trabalho severo na camada de proteção feito pela solda (ZHU *et al.*, 2021).

Existem vários métodos que são usados para melhorar a dureza em superfície de peças e equipamentos metálicos na indústria metal-mecânica, automobilística, naval, no agro, aeroespacial, entre eles, muitos processos são referentes a soldagem (KOCAMAN *et al.*, 2021), os mais comuns são apresentados no grupo AW (*Arc Welding*), como: FCAW, GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) (PAWLIK *et al.*, 2022), GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*) (ABED *et al.*, 2018), PAW (*Plasma Arc Welding*) (LIU *et al.*, 2008), SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*) (CRESPO *et al.*, 2012), SAW (*Submerged Arc Welding*) (MAJETICH, 1985).

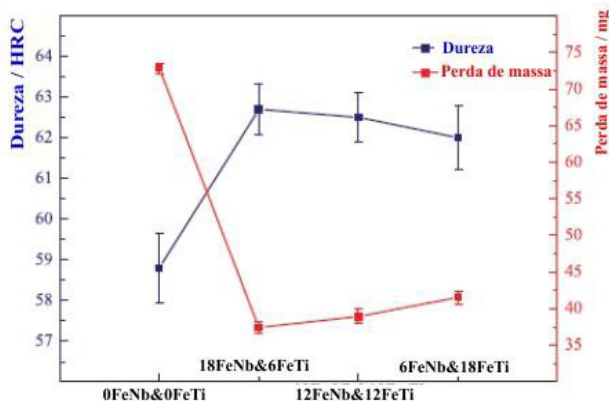
Diante desses diferentes processos de soldagem, a dureza e resistência ao desgaste são características que estão ligadas ao tipo de consumíveis empregados, alguns têm melhores resistências que outros, esses materiais quando depositados em camadas aumentam as propriedades de dureza devido à quantidade de carbono e cromo na microestrutura da solda (PADHIAR; VINCENTE, 2020). As alterações na microestrutura são afetadas pelas quantidades de camadas empregadas para revestir uma peça, em camada única ou na primeira há mistura ocorrendo com metal base, região fundida com presença de metal de adição e base, essas alterações podem ser melhoradas com dois passes ou mais em camadas (VAIKAR *et al.*, 2022).

Em aço macio, usando o processo de soldagem TIG, o efeito do revestimento duro com eletrodo 70S-2 teve uma melhora em

suas propriedades como resistência à corrosão e a dureza com relação ao material original (SURAJ, 2021). Em adição do FeCrC, usando o processo FCAW, Sousa *et al.* (2021) afirma que a microestrutura é um fator de grande importância para descrever o efeito dessa dureza devido à presença de carbeto  $M_7C_3$ .

No revestimento realizado pelo processo de soldagem FCAW de alto teor de Cr e C, a fase primária do carbeto – carboneto primário –  $M_7C_3$  – é rico em Fe e Cr, resultando em carboneto complexo  $(Fe, Cr)_7C_3$ , isto é observado com adição de Mo e Nb – molibdênio e nióbio – formação de complexo carboneto, MC ( $M = \frac{1}{4} Mo$  e Nb), obtendo um aumento da resistência pela formação de carboneto MC e o refinamento de grão de carbonetos  $M_7C_3$ , já com adição de Nb, esse refinamento de grão proporciona maior resistência ao desgaste segundo Serindağ e Çam (2022). No trabalho de Liu *et al.* (2018), usando simultaneamente os elementos Ti, Nb e desoxidante – Al, Mg, Fe-Si, Mn e C – com processo FCAW, foi relatado um aumento na dureza e diminui a perda de massa no revestimento, como observado na Fig. 1.

Figura 1 - Dureza e perda de massa dos componentes adicionando no aço-carbono



Fonte: modificada de Liu *et al.* (2018).

Para Pérez *et al.* (2019), utilizando o eletrodo tubular revestido com a liga FeCrMnC mais o vanádio na composição do material de adição houve um aumento da fase e carboneto de vanádio, significando uma melhora na dureza e no desgaste abrasivo pela formação do carbeto de vanádio.

O desgaste utilizando o ensaio de abrasão por roda de borracha a baixa tensão, usando consumível FeCrC e com fonte de soldagem eletrônica multiprocessado, sem e com adição de Nb e Ti, e o eletrodo ER1, em uma única camada de solda para o revestimento, obteve resistência melhor com +Nb>ER1>+Ti>sem para teste feito em laboratório, porém, Ti>ER1>sem>+Nb, teste em campo; aumentando o teor de cromo e carbono aumenta a resistência aos desgastes abrasivos, esses desgastes são agravados pelas quantidades de trincas de solidificação formadas pelo cordão de solda (LIMA; FERRARESI, 2010).

Avaliação da perda de massa de revestimento duro com arame tubular FeCrC +Ti, com baixa e alta tensão, com e sem gás CO<sub>2</sub>, a energia foi um fator que influenciou na perda de massa do revestimento, a maior energia obteve menor perda de massa, a baixa tensão teve influência nos resultados pela presença de grandes quantidades de trincas (COLAÇO; MARANHÃO, 2014). No estudo de Colaço *et al.*, (2012), não houve perda significativa por desgaste abrasivo em relação ao nível de energia aplicada para o arame FeCrC+Ti, de 1500 j/mm e 800 J/mm, com tensão e corrente, 28V a 25V, 265A a 165A, respectivamente.

O revestimento FeCrC pelo processo FCAW com arame tubular autoprotetido, é formado matriz eutética de austenita mais carbeto, com adição de Nb forma carbonetos de Nb em matriz eutética, o Nb diminuiu a quantidade de trincas, mas não teve variação significativa na dureza; o FeCrC apresentou grande for-

mação de carbonetos primários –  $M_7C_3$  – hexagonal e em agulhas imersos em matriz eutética de austenita mais carbonetos, com  $FeCrC + Nb$  apresentou grande quantidade carboneto de nióbio –  $NbC$  – e pouco carbeto primário –  $M_7C_3$  – circundado por matriz eutética de austenita (LUZ *et al.*, 2020). Segundo Crespo *et al.* (2016), o Nb refina a estrutura e forma carbonetos, sendo mais resistência ao desgaste e quanto mais rico em C maior a dureza, como a Fig. 2, para a seguinte composição do carbono e nióbio(%wt), a) 2,9 – 0, b) 2,93 – 4,75, c) 2,92 – 0, d) 2,96 – 4,46, e) 2,85 – 0, f) 2,88 – 4,73.

Na microestrutura com deposição de  $FeCrC+Ti$  na liga, aumentando o Ti a massa do carbeto MC aumentou, porém diminuindo a formação primário dos carbonetos –  $M_7C_3$ , de acordo com Zhou *et al.* (2013) os carbonetos primários  $(Cr, Fe)_7C_3$  são refinados e a resistência é significativamente melhorado.

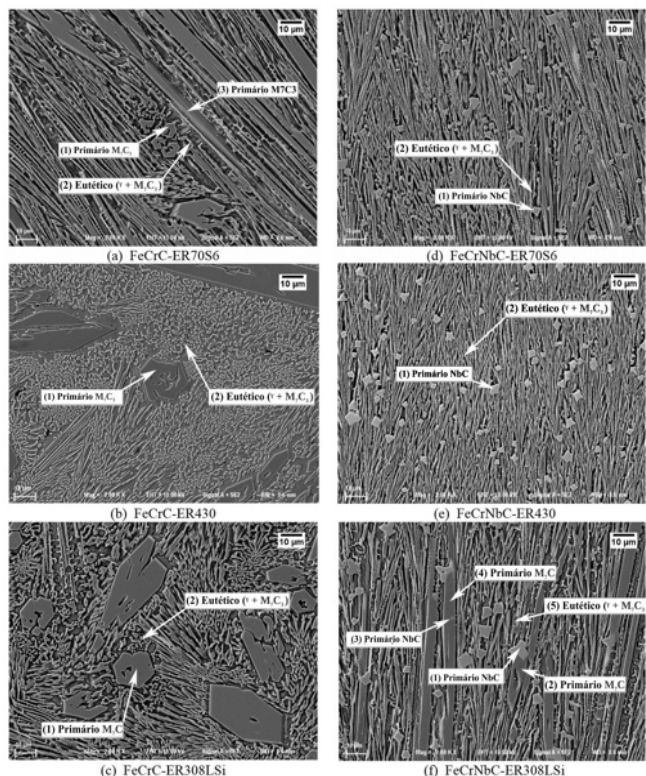
Os testes de duplo arame com amanteigamento e sem nas ligas  $FeCrC$  com adição de Ti e Nb para amenizar as quantidades de trincas nas ligas, o Ti apresentou menos trincas e melhor resistência ao desgaste com a formação de carbeto de titânio e  $M_7C_3$  na matriz austenítica-martensítica, o amanteigamento teve uma piora no desempenho de resistência aos desgastes, com relação ao duplo arame não apresentou melhores significativas (SOUZA; FERRARESI, 2017).

O processo FCAW com adição de carbono – 3,73wt%C, 4,21wt%C e 4,82wt%C – na base do metal A36, aumentou carbeto proeutético, tornando cada vez mais finos esses grãos, melhorando as propriedades da liga (CHANG *et al.*, 2009) (CHANG *et al.*, 2010a) (CHANG *et al.*, 2010a).

Segundo Zhou *et al.* (2018), com revestimento por FCAW a dureza é melhorada pelo carbeto primário –  $(Cr,Fe)_7C_3$  – quando

diminuindo a relação Cr/C a eficácia do carbeta é melhorado, com isto a fração de massa do carboneto é aumentada melhorando o revestimento. Para Zhao *et al.* (2019), o ferro- $\alpha$  e os carbonetos de ferros são diminuídos pela introdução do Cr.

Figura 2 - Formação de carbeta de nióbio



Fonte: modificada de Crespo *et al.* (2016).

O revestimento duro por FeCrC consiste em carboneto primário  $(Cr,Fe)_7C_3$  e as fases eutéticas, com aumento do Cr, o grão foi refinado, aumentou a dureza e a perda por desgaste diminuiu; a maior quantidade de Cr, C e estrutura mais fina aumentavam a dureza (REDDY; THANUSHA, 2016).

### 3. METODOLOGIA

A revisão bibliográfica foi desenvolvida em quatro fases:

#### a) Primeira fase

Pesquisa em fontes primárias com filtro hardfacing e FCAW nas seguintes plataformas: Scopus, DirectScience, Scielo e Engineering Village.

Etapa 1: Os arquivos foram salvos em uma pasta.

Etapa 2: Renomeado em algarismos arábicos 1-227.

#### b) Segundo fase

Etapa 1: Criação de tabela com todos os dados dos artigos, ID de 1-227, ano de publicação, título, revista, autor e link para acessar.

Etapa 2: Eliminação dos arquivos duplicados.

#### c) Terceira fase

Etapa 1: filtro de microestrutura.

Etapa 2: Filtro de FeCrC.

Etapa 3: acréscimo de 5 artigos.

#### d) Quarta fase

Etapa 1: Leitura do resumo.

Etapa 2: Leitura da introdução.

Etapa 3: Leitura da conclusão.

Etapa 4: Leitura completa do artigo.

### 4. CONCLUSÕES

Portanto, o endurecimento de camadas metálicas por soldagem tem resultados positivo que favorece as propriedades desejadas como resistência e dureza e, a grande contribuição para isso ocorrer foi a formação de carbeto nas suas microestruturas

com estrutura granular menor, como o cromo é formador desses carbeto há um favorecimento para formação de contorno de grãos menores na estrutura cristalina da liga. Outras ligas apresentaram resultados satisfatório como Nb, Mo, Ti e V, devido a formação dos carbonetos. Um melhor controle nas formações desses carbonetos trará resultados melhores nesses aços ligas.

## 5. AGRADECIMENTO

Agradeço o apoio da instituição FAPEG pela concessão da bolsa de estudo em mestrado.

## REFERÊNCIAS

- ABED, H.; GHAINI, F. M.; SHAHVERDI, H. R. Characterization of Fe-49Cr18Mo7B16C4Nb6 high-entropy hardfacing layers produced by gas tungsten arc welding (GTAW) process. **Materials Engineering**, v. 352, p. 360-369, 2018.
- CHANG, C. M.; LIN, C. M.; HSIEH, C. C.; CHEN, J. H.; FAN, C. M.; WU, W. Effect of carbon content on microstructural characteristics of the hypereutectic Fe–Cr–C claddings. **Materials Chemistry and Physics**, v. 117, p. 257-261, 2009.
- CHANG, C. M.; HSIEH, C. C.; LIN, C. M.; CHEN, J. H.; FAN, C. M.; WU, W. Effect of carbon content on microstructure and corrosion behavior of hypereutectic Fe–Cr–C claddings. **Materials Chemistry and Physics**, v. 123, p. 241-246, 2010a.
- CHANG, C. M.; CHEN, L. H.; LIN, C. M.; CHEN, J. H.; FAN, C. M.; WU, W. Microstructure and wear characteristics of hypereutectic Fe–Cr–C cladding with various carbon contents. **Surface e Coatings Technology**, v. 205, p. 245-250, 2010b.
- COLAÇO, F. H. G.; MARANHO, O. Avaliação da perda de massa de revestimento duro depositado por soldagem com arame tubular de liga FeCrC-Ti. **Soldag. Insp.**, v. 19, p. 058-068, 2014.
- CRESPO, A. C. C.; FUENTES, R.F.; FERRARESI, A. V.; GONÇALVES, R. A.; SCOTTI, A. Microstructure and Abrasion Resistance of Fe-Cr-C



and Fe-Cr-C-Nb Hardfacing Alloys Deposited by S-FCAW and Cold Solid Wires. **Soldagem e Inspeção**, v. 21, p. 342-353, 2016.

CRESPO, A. C. C.; SCOTTI, A.; FUENTES, A.; MENDEZ, R. F.; ORTIZ, T. Relationship of coating factor of coated tubular electrodes for hardfacing by SMAW process, with the consumption parameters and the geometry of the deposited metal. **Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia**, v. 35, p. 224-232, 2012.

COLAÇO, F. H.; PERUCHI, L. V.; BERNARDI, V. B.; MARANHO, O. Influência da energia de soldagem no desgaste abrasivo de revestimentos duros aplicados pelo processo FCAW. **Soldagem e Inspeção**, v. 19, p. 58-68, 2012.

KOCAMAN, E.; KILINÇ, B.; DURMAZ, M.; ŞEN, Ş.; ŞEN, U. The influence of chromium content on wear and corrosion behavior of surface alloyed steel with Fe(16-x)Cr<sub>x</sub>(B,C)<sub>4</sub> electrode. **Engineering Science and Technology, an International Journal**, v. 24, p. 533-542, 2021.

LIMA, A. C.; FERRARESI, V. A. Análise da resistência ao desgaste de revestimento duro aplicado por soldagem em facas picadoras de cana-de-açúcar. **Soldagem e Inspeção**, v. 15, p. 94-102, 2010.

LIU, D.; WU, M.; LONG, W.; LI, L.; WEI, P. Effect of simultaneous addition of ferriobium and ferrotitanium on properties of hardfacing. **Materials Science and Technology**, v. 34, p. 2231-2240, 2018.

LIU, C. L.; LV, Y. H.; XU, B. S.; XIA, D. Microstructure and tribological properties of layer deposited by micro-plasma arc welding on worn gear. **Engineering Materials**, v. 373-374, p. 338-34, 2008.

LUZ, A. H. S.; TEIXEIRA, F. R.; JUNIOR, M. A. B. P.; MOTA, C.; A. M.; NASCIMENTO, A. S. Aspectos microestruturais e do comportamento mecânico de revestimento duro depositado pelo processo arame tubular. **Revista Matéria**, v. 25, 2020.

MAJETICH, J. C. Optimization of conventional saw for severe abrasion-wear hardfacing application. **Journal Welding. Journal Miami**, v. 64, p. 314, 1985.

NASCIMENTO, G. M. S.; PUKASIEWICZ, A. G. M. Analysis of the FCAW deposition process of a chromium carbide alloy applying central composite circumscribed experimental design. **Welding International**, v. 32:9, p. 579-587, 2018.

PADHIAR, S. A.; VINCENT, S. Effect of hard facing processes on Mild steel A-36 by arc welding. **Materials Today: Proceedings**. v. 28, p. 526-531, 2020.

PAWLIK, J.; CIELIK, J.; BEMBENEK, M.; GÓRAL, T.; KAPAYEVA, S.; KAPKENOVA, M. On the Influence of Linear Energy/Heat Input Coefficient on Hardness and Weld Bead Geometry in Chromium-Rich Stringer GMAW Coatings. **Materials**, v. 15, 2022.

PÉREZ, M. R.; GONZÁLEZ, L. P.; ALFONSO, I. Mejora de la resistencia al desgaste abrasivo de un revestimiento Fe-Cr-Mn-C mediante la adición de V. **Revista Matéria**, v. 24, 2019.

REDDY, K. M. K.; THANUSHA, K. Effect of Chromium Content on Microstructure and Wear Resistance of Fe-Cr-C Hard facing Layers. **Journal of Mechanical and Civil Engineering**, v. 13, p. 72-79, 2016.

SERINDAČ, H. T.; ÇAM, G. Multi-pass butt welding of thick AISI 316L plates by gas tungsten arc welding: Microstructural and mechanical characterization. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, v. 200, 2022.

SOUSA, J. M. S.; LOBATO, M. Q.; GARCIA, D. N.; MACHADO, P. C. Abrasion resistance of Fe-Cr-C coating deposited by FCAW welding process. **Wear**, v. 476, 2021.

SOUZA, D. D. B. G. de; FERRARESI, V. A. Aplicação de revestimento duro utilizando o processo FCAW duplo arame para diferentes tipos de consumíveis utilizados na indústria sucroalcooleira. **Revista Matéria**, v. 22, n. 1, 2017.

SURAJ, R. Hardfacing and its effect on wear and corrosion performance of various ferrous welded mild steels. **Materials Today: Proceedings**, v. 42, p. 842-850, 2021.

VAIKAR, S. J.; GEORGE, V. N.; CHELLATHU, J.; KANISH, T. C.; RAMKUMAR, K. D. Effect of weld microstructure on the tensile properties and impact toughness of the naval, marine-grade steel weld joints. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 19, p. 3724-3737, 2022.

ZHAO, C.; XING, X.; GUO, J.; SHI, Z.; ZHOU, Y.; REN, X.; YANG, Q. Micro-properties of (Nb,M)C carbide (M<sup>1/4</sup> V, Mo, W and Cr) and precipitation behavior of (Nb,V)C in carbide reinforced coating. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 788, p. 852-860, 2019.

ZHOU, Y. F.; YANG, Y. L.; YANG J.; ZHANG, P. F.; QI X. W.; REN X. J.; YANG, Q. X. Wear resistance of hypereutectic Fe–Cr–C hardfacing coatings within situ formed TiC. **Institute of Materials**, v. 29, n. 5, p. 366-373, 2013.

ZHOU, Y. F.; QIN, G. K.; JIANG, P. J.; WANG, S. F.; Qi, X. W.; XING, X. L.; YANG, Q. X. Dry Sliding Wear Behavior of (Cr, Fe)<sub>7</sub>C<sub>3</sub>-γ(Cr, Fe) Metal Matrix Composite (MMC) Coatings: The Influence of High Volume Fraction (Cr,Fe)<sub>7</sub>C<sub>3</sub> Carbide. **Tribology Letters**, v. 66, p. 108, 2018.

ZHU, Y.; M. U., W; CAI, Y.; XIN, D.; WANG, M. A novel high-efficient welding technology with rotating arc assisted by laser and its application for cryogenic steels. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 68, p. 1134-1146, 2021.

#### **SOBRE O E-BOOK**

---

Tipologia: Palatino Linotype, Times New Roman, Brevia, Bree Serif Regular

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