



# REVISTA MILITAR de CIÊNCIA e TECNOLOGIA

Versão impressa: ISSN 0102-3543

Volume XL - 3º Trimestre de 2023

## ENGENHARIA MILITAR

**Mobilidade,  
Contramobilidade e  
Proteção**

Avaliação da tenacidade de aço de ultra-alta dureza para aplicação balística por ensaio de impacto - Pág 4

Estudo da composição, estrutura e efeito da absorção de água em cascos bovinos oriundos da região Nordeste - Pág 15

Deteção de Fake News nas Redes Sociais Virtuais: uma revisão dos métodos baseados em dados de propagação - Pág 27

Desenvolvimento de um sistema de pulverização catódica com fonte de radiofrequência assistido por campos magnéticos para produção de filmes finos - Pág 37

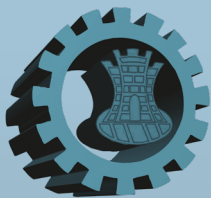
Impacto do fechamento dos aeroportos por condições meteorológicas no atraso dos voos e o custo da emissão de CO<sub>2</sub> - Pág 46

Síntese e caracterização de nanopartículas de CsFeO<sub>2</sub> utilizando o método sol-gel/combustão - Pág 59

Avanços da detecção de sinais de tiros baseada em sensores acústicos - Pág 62







## REVISTA MILITAR DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Comandante do Exército:

Gen Ex Tomás Miguel Ribeiro Paiva

Departamento de Ciência e Tecnologia:

Gen Ex Achilles Furlan Neto

Departamento de Educação e Cultura do Exército:

Gen Ex Francisco Carlos Machado Silva

Comandante do Instituto Militar de Engenharia:

Gen Div Juraci Ferreira Galdino

Diretor da BIBLIEx:

Cel Art Marcos Walfrido Ricarte Figueiredo

CORPO REDATORIAL:

Editor-chefe:

Prof. Dr. Fernando Manuel Araújo Moreira

Editor-chefe adjunto:

Prof. Dr. Álvaro José Boaretto Mendes

Editores adjuntos:

Prof. Dr. Marcelo de Miranda Reis

Prof. Dr. Paulo Henrique Coelho Maranhão

Editores de área:

Engenharia Civil, Transportes e Ciências Ambientais: Prof. Dr. Filipe Almeida Corrêa do Nascimento • Engenharia Elétrica e áreas afins: Prof. Dr. Antônio Eduardo Carrilho da Cunha • Engenharia Mecânica e áreas afins: Prof. Dr. André Luiz Tenório Rezende • Engenharia Química e áreas afins: Prof. Dr. Julio Zukerman Schpector • Engenharia Cartográfica: Prof. Dr. Wagner Braga Nunes Coelho • Engenharia Nuclear: Profa. Dra. Inaya Correa Barbosa Lima • Ciência e Engenharia de Materiais: Prof. Dr. André Ben-Hur da Silva Figueiredo • Ciência e Engenharia da Computação: Prof. Dr. Paulo Cesar Salgado Vidal • Engenharia de Defesa: Prof. Dr. Giuseppe Miceli Junior • Outras áreas: Prof. Dr. Marcelo de Miranda Reis

Editores associados externos:

• Dr. André Fenili – Universidade Federal do ABC, Santo André, SP • Dr. Fernando Fachini Filho – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, SP • Dr. José Carlos Costa da Silva Pinto – Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ • Dr. José Carlos Maldonado – Universidade de São Paulo, São Carlos, SP • Dr. Júlia Célia Mercedes Strauch – Escola Nacional de Ciências Estatísticas, RJ • Dr. Luiz Pereira Calôba – Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ • Dr. Otto Corrêa Rotunno Filho – COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ • Dr. Richard Magdalena Stephan – COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ • Dr. Webe João Mansur – COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ • Dr. Carlos Alberto Nunes Consenza – COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ

DIREÇÃO, IMPRESSÃO E DISTRIBUIÇÃO:

Diretor:

Cel Art Marcos Walfrido Ricarte Figueiredo

Editor executivo:

Cap R1 Antônio Carlos Manhães de Souza

ADMINISTRAÇÃO, REVISÃO, PROGRAMAÇÃO E DIAGRAMAÇÃO:

Coordenação: INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA – IME

Redação, Diagramação e OJS:

Rubenildo Python de Barros

Marcela Fagundes Casotti

Luiz Tadeu Carqueija Mota

Revisão Tikinet:

Revisores: Cristina Saez; Guilherme Oliveira; Piero Kanaan • Diagrama-

dor: Lúvia Loureiro; Ilário Junior

Impressão e distribuição:

BIBLIEx



Desde 1949

"A Gráfica do Exército" - Compromisso com a Qualidade

Impresso na Gráfica do Exército

Al. Mal. Rondon - Setor de Garagens - QGEx - SMU - CEP:70630-901 - Brasília - DF

Tel: 3415-4367 - Site: <http://www.graficadoexercito.eb.mil.br>

E-mail: [divmcl@graficadoexercito.eb.mil.br](mailto:divmcl@graficadoexercito.eb.mil.br)

PUBLICAÇÃO TRIMESTRAL



## REVISTA MILITAR de CIÊNCIA e TECNOLOGIA

REVISTA MILITAR DE CIÊNCIA E

TECNOLOGIA - Volume XL

3º Trimestre de 2023

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA - IME

Praça General Tibúrcio, 80 - Praia Vermelha -

Rio de Janeiro-RJ - CEP 22.290-270 -

Tel.: (21) 2546-7115

Website: <https://ebrevistas.eb.mil.br/CT> - Email:

[rmct@ime.eb.br](mailto:rmct@ime.eb.br)

BIBLIOTECA DO EXÉRCITO

EDITORA (BIBLIEx)

Palácio Duque de Caxias - Praça D. de Caxias, 25

3º andar - Ala Marcílio Dias

Centro - Rio de Janeiro-RJ

CEP 20.221-260

Tel.: (21) 2519-5707

ACESSE NOSSA REVISTA DIGITAL



Nossa capa:

Homenagem ao Quadro de Engenheiros Militares





A análise da ciência, a tecnologia e a sociedade atuais permitem delinear um panorama da pesquisa brasileira contemporânea. Assim, num cenário global cada vez mais interconectado e desafiador, a produção científica nacional oriunda das mais diversas instituições acadêmicas públicas e privadas do país, tem se destacado por sua diversidade temática e profundidade metodológica. Os recentes avanços em áreas como engenharia de materiais, ciência ambiental, tecnologia da informação e segurança pública revelam não apenas o vigor da pesquisa nacional, mas também seu compromisso com questões estratégicas e sociais. Este editorial reúne sete estudos que exemplificam essa multiplicidade de abordagens e aplicações assim como, propõe uma reflexão sobre esses assuntos que ilustram esse avanço multifacetado fortemente baseado na inovação.

### *Materiais de Alta Performance para Defesa Balística*

A avaliação da tenacidade de aço de ultra-alta dureza para aplicação balística por ensaio de impacto representa um avanço significativo na engenharia de materiais voltada à proteção pessoal e veicular. A busca por ligas metálicas capazes de resistir a impactos extremos sem comprometer a integridade estrutural é essencial para o desenvolvimento de blindagens mais leves e eficazes, com aplicações tanto militares quanto civis.

### *Biomateriais Regionais: O Caso dos Cascos Bovinos Nordestinos*

O estudo da composição, estrutura e efeito da absorção de água em cascos bovinos oriundos da região Nordeste revela o potencial de materiais biológicos como fontes de conhecimento para aplicações veterinárias, industriais e ambientais. A análise da interação entre estrutura orgânica e umidade pode contribuir para práticas mais sustentáveis na pecuária e no reaproveitamento de resíduos agroindustriais.

### *Fake News e Redes Sociais: Uma Abordagem Computacional*

A crescente preocupação com a desinformação digital é abordada na revisão dos métodos baseados em dados de propagação para detecção de Fake News nas redes sociais virtuais. Ao investigar como notícias falsas se disseminam em ambientes digitais, pesquisadores propõem algoritmos mais eficazes para identificar padrões de manipulação e mitigar seus efeitos sobre a opinião pública.

### *Tecnologia de Filmes Finos: Inovação em Engenharia de Superfícies*

O desenvolvimento de um sistema de pulverização catódica com fonte de radiofrequência assistido por campos magnéticos para produção de filmes finos representa uma fronteira tecnológica na fabricação de dispositivos eletrônicos, ópticos e biomédicos. A precisão na deposição de materiais em escala nanométrica é fundamental para a miniaturização e eficiência de componentes avançados.

### *Meteorologia, Transporte Aéreo e Sustentabilidade*

O impacto do fechamento dos aeroportos por condições meteorológicas no atraso dos voos e o custo da emissão de CO<sub>2</sub> evidencia a intersecção entre clima, logística e meio ambiente. A análise dos efeitos colaterais de eventos climáticos extremos sobre o transporte aéreo reforça a necessidade de políticas integradas que considerem tanto a eficiência operacional quanto a sustentabilidade.

### *Nanotecnologia Verde: Síntese de CsFeO<sub>2</sub> por Sol-Gel/Combustão*

A síntese e caracterização de nanopartículas de CsFeO<sub>2</sub> utilizando o método sol-gel/combustão destaca o papel da nanotecnologia na criação de materiais multifuncionais com propriedades magnéticas, catalíticas e eletrônicas. O uso de técnicas de baixo custo e menor impacto ambiental reforça o compromisso com uma ciência mais limpa e acessível.

### *Segurança Pública Inteligente: Detecção Acústica de Tiros*

Por fim, os avanços da detecção de sinais de tiros baseada em sensores acústicos apontam para soluções tecnológicas que podem transformar a resposta a situações de violência urbana. Sistemas inteligentes capazes de identificar disparos em tempo real oferecem suporte crucial às forças de segurança e à proteção de comunidades vulneráveis.

Em conclusão, esses estudos, embora diversos em escopo, refletem o dinamismo da pesquisa nacional e sua capacidade de dialogar com os grandes desafios contemporâneos. Da segurança pública à sustentabilidade, da inovação tecnológica à valorização de recursos regionais, a ciência nacional continua a construir pontes entre conhecimento e transformação social. É nesse contexto que se encontra o Instituto Militar de Engenharia, uma Universidade corporativa bicentenária que tem como objetivo primordial atender às necessidades do Exército Brasileiro, mas sem deixar de lado aplicações duais que possam vir a contribuir o máximo possível com a sociedade civil. Dessa maneira, aparece como primordial na área de ciência e tecnologia militar o papel a ser desempenhado pela *Revista Militar de Ciência e Tecnologia* (RMCT, publicação *Open Access*) uma das publicações regulares do Exército Brasileiro.

Excelente leitura a todos!

**Dr. Eng. Fernando M. Araujo-Moreira**  
**Editor-chefe da RMCT**



---

# SUMÁRIO

---

- 3** Avaliação da tenacidade de aço de ultra-alta dureza para aplicação balística por ensaio de impacto  
Charles Hudson Martins de Vasconcelos, Cristhian Ricardo Loayza Loayza, Ademir Ângelo Castro Filho, Eduardo de Magalhães Braga, Andersan dos Santos Paula, Ricardo Pondé Weber
  
- 14** Estudo da composição, estrutura e efeito da absorção de água em cascos bovinos oriundos da região Nordeste  
Wendell Bruno Almeida Bezerra, Ulisses Oliveira Costa, Fabio da Costa Garcia Filho, Sergio Neves Monteiro
  
- 26** Detecção de Fake News nas Redes Sociais Virtuais: uma revisão dos métodos baseados em dados de propagação  
Argus Antonio Barbosa Cavalcante, Paulo Márcio Souza Freire, Ronaldo Ribeiro Goldschmidt, Claudia Marcela Justel
  
- 36** Desenvolvimento de um sistema de pulverização catódica com fonte de radiofrequência assistido por campos magnéticos para produção de filmes finos  
Austim Mota Gomide Pimenta, Carlos Ferreira
  
- 45** Impacto do fechamento dos aeroportos por condições meteorológicas no atraso dos voos e o custo da emissão de CO<sub>2</sub>  
Reinaldo Moreira Del Fiaco, Marcelo de Miranda Reis, José Carlos Cesar Amorim
  
- 58** Síntese e caracterização de nanopartículas de CsFeO<sub>2</sub> utilizando o método sol-gel/ combustão  
Camila Oliveira Baptista, Bruno Cardoso, Danúbia de Carvalho, Claudio de Oliveira, Ronaldo de Biasi, André Ben-Hur Figueiredo
  
- 61** Avanços da detecção de sinais de tiros baseada em sensores acústicos  
José Antonio Apolinário Junior, Lucas Rafael de Aguiar Silva

# Avaliação da tenacidade de aço de ultra-alta dureza para aplicação balística por ensaio de impacto

Charles Hudson Martins de Vasconcelos<sup>1,3</sup>, charles.vasconcellos@ime.eb.br, Orcid 0000-0002-3472-2998

Cristhian Ricardo Loayza Loayza<sup>2</sup>, crislo@ufpa.br, Orcid 0000-0002-0662-715X

Ademir Ângelo Castro Filho<sup>2</sup>, engangelo80@gmail.com, Orcid 0000-0003-4713-0817

Eduardo de Magalhães Braga<sup>2</sup>, edbraga@ufpa.br, Orcid 0000-0003-0739-7592

Andersan dos Santos Paula<sup>1</sup>, andersan@ime.eb.br, Orcid 0000-0002-0904-4240

Ricardo Pondé Weber<sup>1</sup>, rpweber@ime.eb.br, Orcid 0000-0002-7431-8316

<sup>1</sup>Instituto Militar de Engenharia - IME, <sup>2</sup>Universidade Federal do Pará - UFPA,

<sup>3</sup>Centro de Instrução Almirante Braz de Aguiar - CIABA

**RESUMO:** Os aços de nível de blindagem de ultra-alta dureza são comumente utilizados nos setores de veículos de patrulha, veículos de transporte de valores, viaturas blindadas de transporte de pessoas, proteção de edificações, entre outros. O objetivo deste trabalho se constituiu na avaliação da tenacidade de um material dessa classe, determinando a temperatura de transição dúctil-frágil (TTDF) utilizando algumas das suas definições. Realizou-se ensaios de impacto Charpy e a avaliação combinada das faces de fratura dos corpos de prova por macroscopia e microscopia. Os testes foram realizados em temperaturas que variaram de -60°C a temperatura ambiente com corpos de prova retirados longitudinalmente à direção de laminação. As análises micrográficas ostentaram que a determinação da TTDF por critério de absorção de energia é adequada e confiável. Os resultados logrados são que, com base em 12,92 J de energia absorvida, a temperatura é -27,73°C.

**PALAVRAS-CHAVE:** Tenacidade, temperatura de transição dúctil-frágil, ensaio de impacto, aço de ultra-alta dureza.

**ABSTRACT:** Ultra-high hardness armor level steels are commonly used in the sectors of patrol vehicles, valuables transport vehicles, armored personnel carriers, protection of buildings, among others. The objective of this work was to evaluate the tenacity of a material of this class by determining the ductile-brittle transition temperature (DBTT) using some of its definitions. Charpy impact tests and the combined evaluation of the fracture faces of the specimens by macroscopy and microscopy were carried out. The tests were carried out at temperatures ranging from -60°C to room temperature with specimens taken longitudinally in the rolling direction. Micrographic analyzes showed that the determination of DBTT by energy absorption criterion is adequate and reliable. The achieved results are that based on 12.92 J of absorbed energy the temperature is -27.73°C.

**KEYWORDS:** Toughness, ductile-brittle transition temperature, impact testing, ultrahigh hardness steel.

## 1. Introdução

Nas últimas décadas, os estudos envolvendo a área de blindagem sempre estiveram engajados em esforços para fornecer tecnologias de blindagem leve que possam derrotar projéteis (AP, *Armor-Piercing*). Para atender a esses requisitos, a disponibilidade de aços de blindagem temperados e revenidos foi elevada, e o mais importante: a especificação MIL-DTL-46100E foi atualizada para aços de alta dureza de blindagem (HHA, *High Hardness Armor*) [1]. Embora essa especificação metálica tenha atendido às aplicações pretendidas, esforços consideráveis têm sido feitos para desenvolver aços de ultra-alta dureza – temperados e revenidos (UHH-Q&T, *Ultra High Hard Armor - Quenched and Tempered*) com dureza de 600 HB ou superior [2].

Os vários tipos de aço oferecidos por cada fornecedor são geralmente diferenciados de acordo com um valor de dureza específico e crescente. O menor valor de dureza corresponde ao aço de blindagem homogênea laminada (RHA, *Rolled Homogeneous Armor* - 380-430 HBW), em seguida o aço de média dureza de blindagem (MHA, *Medium Hard Armor* - 420-480 HBW), o aço HHA (480-540 HBW), e o maior nível de dureza é atingido com o aço UHA ou o UHH-Q&T (570-640 HBW) [3].

Dando foco à interação projétil-alvo, pode-se determinar que os mecanismos de penetração são consequentes da propriedade que representa o grau de deformação que um material suporta até o momento de sua fratura. No material dúctil, ocorre fratura devido à onda de tensão inicial, fratura radial,

estilhaçamento, batoque, pétala frontal, pétala dorsal, fragmentação e alargamento dúctil de furo. Porém, quando se adota um material frágil, pode-se resumir todo estudo às características de fragmentação [4].

Esses fenômenos trazem à tona a necessidade de determinar uma temperatura limite, abaixo da qual o comportamento à fratura do material se altera de dúctil para frágil, de maneira a prever ocorrências de fratura frágil. Essa temperatura é denominada Temperatura de Transição Dúctil-Frágil (TTDF) dos materiais e o ensaio de impacto Charpy é considerado um dos que mais se adequa às necessidades para o estudo desse assunto [5-7].

Recolhendo os dados de absorção de energia, por meio do ensaio de impacto Charpy, de materiais metálicos como o aço UHH-Q&T, em diversas temperaturas, pode-se determinar a TTDF desse material. Usualmente, vê-se que ocorrem dois patamares de energia absorvida, chamados de patamar inferior e patamar superior, e uma região entre eles, denominada de zona de transição [8-12].

Sabe-se, portanto, que em temperaturas equivalentes ao patamar inferior de absorção de energia, o material apresentará fratura, sobretudo frágil com predominância do micromecanismo de fratura por clivagem, enquanto em temperaturas correspondentes ao patamar superior de absorção de energia, o material apresentará fratura de modo majoritário dúctil por coalescimento de microcavidades. Tarefa laboriosa, entretanto, é determinar a TTDF, que será uma temperatura de referência para a mudança de comportamento à fratura do material, de dúctil para frágil, com a redução da temperatura [10, 13-15].

A verificação de como a face de fratura se apresenta é uma das metodologias para designar a TTDF, variando de uma fratura de aspecto 100% brilhante para 100% opaco, sendo esta uma caracterização feita exclusivamente pela observação visual da face de fratura, tornando possível estabelecer uma temperatura a partir da qual a mudança no micromecanismo de fratura ocorre. Entretanto, seria necessário um critério adequado para definir a TTDF, pois somente pela avaliação desses corpos de prova fraturados uma determinação adequada seria difícil na prática exper-

imental. Para isso, pode-se utilizar a metodologia indicada na norma ASTM E23 [16], que é a norma de execução do ensaio de impacto.

No entanto, o método comparativo visual descrito na norma é impreciso, pois as fotografias a serem utilizadas para comparação com as faces de fratura dos corpos de prova ensaiados deixam a desejar no preceito qualidade, ocasionando uma comparação com alta probabilidade de imprecisão [17-20]. Dessa forma, a aplicação de outras metodologias para determinação da TTDF se faz importante. No método mais simples e preciso, a TTDF é determinada a partir da curva de energia absorvida em função da temperatura, e um critério possível nesse cenário é considerar que a TTDF é a temperatura na qual se atinge a média de energia entre os patamares superior e inferior da curva, ilustrada na Fig. 1 [21-23].

Diante desse contexto, o objetivo deste trabalho foi realizar a determinação da TTDF utilizando algumas das suas definições combinadas com macroscopia e microscopia da superfície de fratura e fatores metalúrgicos. Diferentes temperaturas de ensaio foram utilizadas, visando abranger desde as temperaturas para as quais se espera que o material de interesse apresente fratura 100% frágil até as temperaturas para as quais ocorra fratura 100% dúctil.

## 2. Material e métodos

### 2.1 Material

O material em estudo é o aço UHH classe de 1500 MPa de limite de escoamento, espessura 5 mm, temperado e revenido (QT, *Quenched and Tempered*), classificado como nível de blindagem. Esse material atende aos requisitos de tolerâncias de formato de acordo com a norma EN 10029 [24], de tolerâncias de planicidade de acordo com a norma EN 10029 Classe N - Tipo de aço L [24] e de propriedades de superfície conforme a EN 10163-2 Classe B Subclasse 3 [25].

A aplicabilidade desse material é como uma chapa de proteção adicional, ou em casos nos quais o peso é crítico, proporcionando proteção tanto contra penetração quanto contra explosões. Esse mesmo material é aplica-



do aos setores de veículos de patrulha, veículos de transporte de valores (CIT, *Cash in Transit Vehicle*), viaturas blindadas de transporte de pessoas (VBTP), proteção

de edificações, entre outros. A composição química e as propriedades mecânicas do material, especificadas em norma, são exibidas nas **Tabelas 1 e 2**, respectivamente.

**Tab. 1** - Composição química principal do material (% massa).

| C    | Si   | Mn   | Ni   | Cr   | Mo   | B      | S     | P    |
|------|------|------|------|------|------|--------|-------|------|
| 0,47 | 0,70 | 1,00 | 3,00 | 1,50 | 0,70 | 0,0005 | 0,003 | 0,01 |

Fonte: [26].

**Tab. 2** - Principais propriedades mecânicas do material.

| Dureza<br>HBW | Limite de Escoamento<br>$R_{p_{0,2}}$ mín. MPa | Limite de Resistência<br>$R_m$ mín. MPa | Alongamento<br>% |
|---------------|------------------------------------------------|-----------------------------------------|------------------|
| 570-640       | 1500                                           | 2000                                    | 7                |

Fonte: [26].

## 2.2 Preparação de amostras

As amostras de teste foram retiradas de uma chapa do aço UHH-Q&T de dimensões 500 x 500 x 5 mm por meio do processo de usinagem eletroerosão. As dimensões da amostra seguem a classificação *sub-size* da norma ASTM E23 [16], ou seja, 10 x 5 x 55 mm com um entalhe em V de 2 mm de profundidade na espessura de 5 mm, ângulo 45°, com um raio de ponta de 0,25 mm no centro da amostra e verificação do mesmo com projetor de perfil e microscópio óptico (MO).

## 2.3 Ensaio de impacto Charpy

Os ensaios de impacto Charpy foram realizados em um equipamento de ensaios de impacto marca Panambra, modelo PW30/15R, com martelo de 30 J, conforme a norma ASTM E23 [16], utilizando três corpos de prova para cada temperatura. Os ensaios iniciaram a temperatura ambiente (20,8°C) e foram estendidos para temperaturas menores: 0°C, -20°C, -40°C e -60°C. Para atingir essas temperaturas abaixo da temperatura ambiente, os corpos de prova foram inseridos no nitrogênio líquido, obtendo, assim, a energia absorvida em função da temperatura.

Para a avaliação dos dados obtidos por meio do ensaio Charpy, é elaborada uma curva de energia

absorvida em função da temperatura, porém para uma melhor clareza nas análises, essa curva obtida deve ser ajustada, e o método utilizado foi fundamentado no proposto por Ericksonkirk, Shaikh e Ericksonkirk [27]. Por esse método, os dados de energia absorvida em função das temperaturas utilizadas no ensaio foram ajustados pela formulação baseada em tangente hiperbólica, a qual cumpre a Eq. 1.

$$Y = A + B * \tanh \frac{T - D}{C} \quad (1)$$

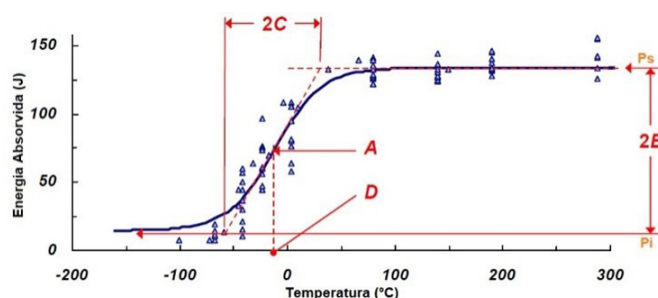
Na Eq. 1, Y é a variável a ser ajustada e T é a variável temperatura de teste. As variáveis de ajuste A, B, C e D são ilustradas na **Fig. 1** e são definidas deste modo: A: média das energias entre patamares superior e inferior; B: amplitude entre energias dos patamares superior e inferior; C: metade da faixa da temperatura de transição; e D: temperatura da média dos patamares inferior e superior.

O valor da TTDF foi estabelecido de acordo com as seguintes definições:

- $TTDF_{EA}$ : Temperatura de Transição Dúctil-Frágil, na qual ocorre a média aritmética das energias absorvidas nos patamares superior e inferior.
- $TTDF_{DN}$ : Temperatura de Transição Dúctil-Frágil, na qual ocorre transição de ductilidade nula, ou seja, fratura 100% frágil.

- $TTDF_{FN}$ : Temperatura de Transição Dútil-Frágil, na qual ocorre transição de fragilidade nula, ou seja, fratura 100% dútil.

**Fig. 1** - Ilustração das variáveis de ajuste da equação da tangente hiperbólica.



Fonte: [27].

## 2.4 Macroscopia versus microscopia da fratura

A análise da superfície da fratura foi realizada em corpos de prova fraturados em ensaios de impacto Charpy. As amostras foram previamente limpas em aparelho de ultrassom com uso de solução de acetona.

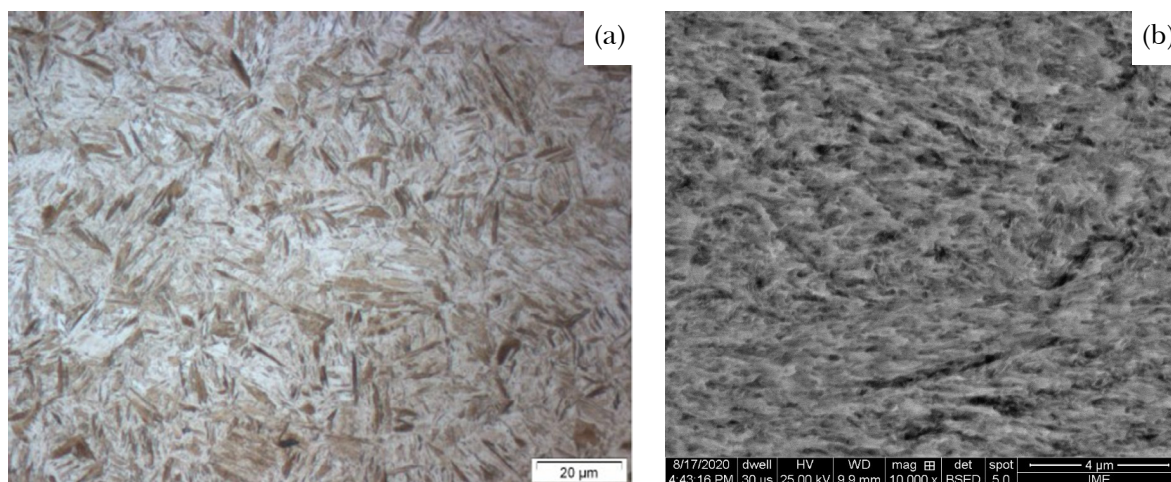
Para a geração de imagens, fez-se o uso de um Estereomicroscópio óptico ZEISS SteREO Discovery V12 e um microscópio eletrônico de varredura (MEV) marca FEI, modelo Quanta FEG 250, conforme a norma ASTM E2142 [28].

## 3. Resultados e discussão

O aspecto microestrutural do MB utilizando MO, presença de ripas colunares e blocos de ripas, após ataque com concentração de nital reativo 2%, pode ser observado na **Fig. 2(a)**, a qual certifica que consiste em aço martensítico temperado. Na **Fig. 2(b)**, é apresentada a imagem MEV, que indica que as ripas mostradas na imagem anterior são ripas de martensita em formato acicular.

Um dos principais propósitos consistiu em determinar se o material em estudo apresenta ou não uma transição dútil-frágil com o decréscimo da temperatura e, caso positivo, em que faixa de temperatura o fenômeno ocorre. A transição dútil-frágil é relacionada com a temperatura pela energia de impacto medida no ensaio.

**Fig. 2** - Microestrutura do MB: (a) micrografia via MO; (b) micrografia via MEV.



Para alguns pesquisadores como Burdekin e Folch [29], a  $TTDF$  é definida como a faixa de temperatura sobre a qual a mudança nos níveis de energia de baixo para alto ocorre. Porém, como na prática geralmente não ocorre uma variação brusca de energia, mas

ocorre uma zona de transição, torna-se difícil determinar com exatidão a  $TTDF$ . Assim, realizou-se uma série de ensaios a diferentes temperaturas combinados com análises macroscópicas, microscópicas e de composição química, o que permitiu a determinação

da TTDF, que é um parâmetro importante na seleção de um material do ponto de vista de tenacidade ou de tendência para a ocorrência de fratura frágil [29].

### 3.1 Energia absorvida

Na **Tabela 3**, encontram-se os valores obtidos nos ensaios Charpy fazendo uso dos corpos de prova confeccionados com o material em estudo. Convém mencionar que todos os corpos de prova separaram totalmente durante o ensaio.

**Tab. 3** - Resultados do ensaio de impacto Charpy (valores em Joule).

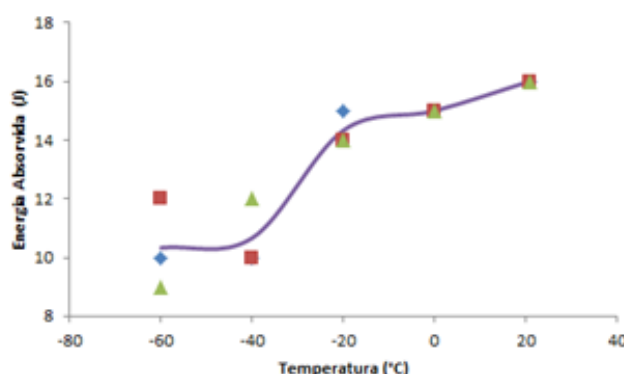
| Temperatura (°C) | CP01 | CP02 | CP03 | Média |
|------------------|------|------|------|-------|
| 20,8             | 16,0 | 16,0 | 16,0 | 16,0  |
| 0,0              | 15,0 | 15,0 | 15,0 | 15,0  |
| -20,0            | 15,0 | 14,0 | 14,0 | 14,3  |
| -40,0            | 10,0 | 10,0 | 12,0 | 10,7  |
| -60,0            | 10,0 | 9,0  | 12,0 | 10,3  |

A **Fig. 3** mostra a curva da energia absorvida em função da temperatura do aço UHH-Q&T em estudo. O comportamento da curva obtida é característico de aços de alta resistência, uma variação relativamente reduzida da energia absorvida em um interstício da temperatura de -80 a 100°C [5]. É plausível a percepção na curva de que em temperaturas mais elevadas, a energia de impacto é maior e é compatível com um modo dúctil de fratura. À medida que a temperatura diminui, a energia de impacto reduz ao longo de um entreto de temperatura relativamente pequeno (cerca de 20°C), a partir do qual a energia de impacto apresenta um valor baixo e essencialmente constante; nesse intervalo, o modo de fratura é frágil.

O valor de energia absorvida é obtido pela leitura direta do valor na escala do equipamento de ensaio. Sendo plotados esses valores em função da temperatura utilizada no ensaio, é possível verificar a mudança de comportamento do material de acordo com a mudança na temperatura. As regiões dos patamares

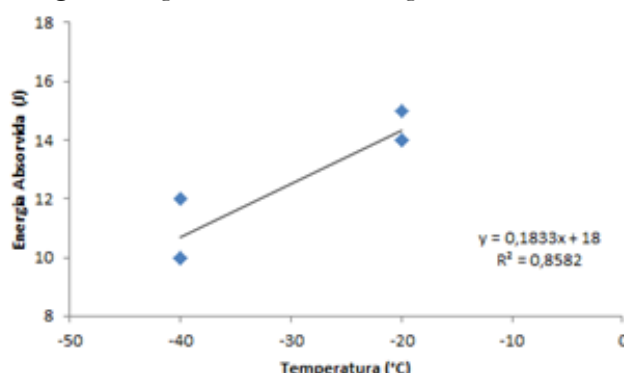
foram identificadas por exame visual dos pontos plotados no gráfico. Assim, foi constatado que o patamar inferior advém à temperatura de -60°C, enquanto o superior no intervalo de 0°C a 20,8°C.

**Fig. 3** - Curva da energia absorvida em função da temperatura no ensaio de impacto Charpy.



Após a definição dos patamares de energia, procedeu-se ao ajuste por regressão linear da região de transição (-40 a -20°C). Os resultados estão apresentados na **Fig. 4**. Em seguida, o ajuste pela tangente hiperbólica foi realizado por meio da aplicação do programa MS – Excel Função Solver. Na **Fig. 5**, são apresentados os resultados obtidos: a forma gráfica; a equação da hipérbole ajustada; e o valor do coeficiente de correlação ( $R^2$ ) referente ao ajuste dos pontos experimentais com a curva da tangente hiperbólica.

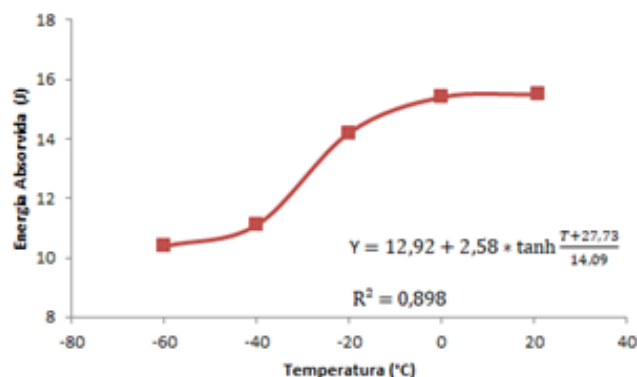
**Fig. 4** - Regressão linear da região de transição.



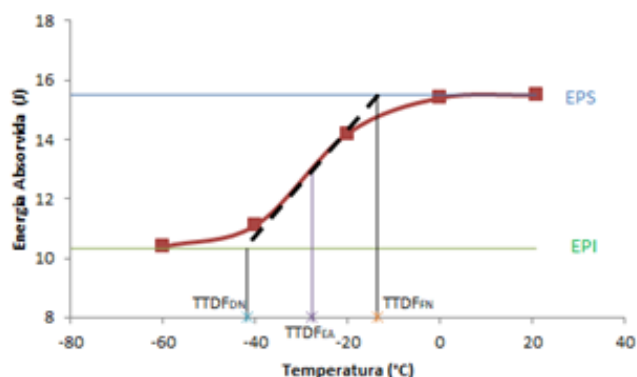
Com a elaboração dos gráficos apresentados, foi possível determinar os seguintes parâmetros, os quais estão ilustrados na **Fig. 6**: temperaturas  $TTDF_{EA}$ ,  $TTDF_{DN}$  e  $TTDF_{FN}$ ; e energia do parâmetro superior

(EPS) e do parâmetro inferior (EPI). Na **Tabela 4**, encontram-se os valores desses parâmetros e das temperaturas do parâmetro superior (TPS) e do parâmetro inferior (TPI) por critério de energia absorvida.

**Fig. 5** - Curva da energia absorvida em função da temperatura ajustada pelo método da tangente hiperbólica.



**Fig. 6** - Parâmetros  $TTDF_{EA}$ ,  $TTDF_{DN}$ ,  $TTDF_{FN}$ , EPS e EPI.



**Tab. 4** - Resultados obtidos por critério de energia absorvida com a utilização do método da tangente hiperbólica.

| Parâmetro        | Valor  |
|------------------|--------|
| $TTDF_{EA}$ (°C) | -27,73 |
| $TTDF_{DN}$ (°C) | -41,83 |
| $TTDF_{FN}$ (°C) | -13,64 |
| EPS (J)          | 15,50  |

| Parâmetro | Valor  |
|-----------|--------|
| TPS (°C)  | -13,64 |
| EPI (J)   | 10,33  |
| TPI (°C)  | -41,83 |

### 3.2 Análise macroscópica e microscópica

As macrografias das superfícies de fratura dos corpos de prova estão apresentadas na **Fig. 7**. É perceptível visualmente que, embora haja probabilidade da ocorrência de discrepância, conforme a temperatura de ensaio reduz, ocorre o decréscimo de fratura por cisalhamento, ou seja, o percentual de área de fratura dúctil reduz, dando lugar à fratura frágil. Já no que se refere ao tópico expansões laterais, não foi evidenciada a ocorrência, mesmo nos corpos de prova a 0°C e temperatura ambiente, classificados a princípio como principalmente dúcteis.

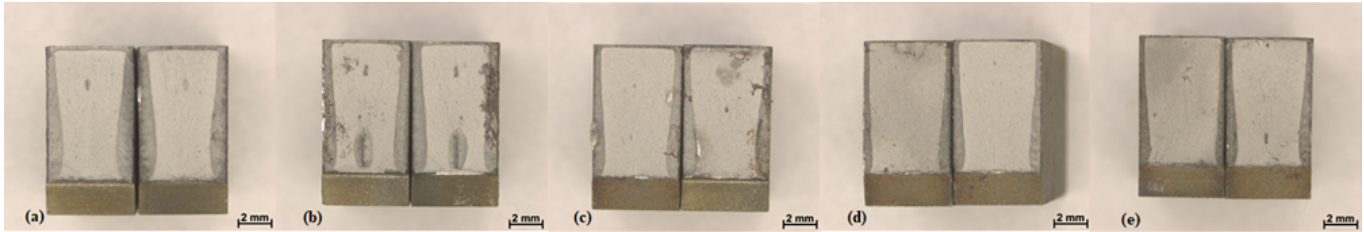
É possível realizar a classificação e quantificação dessas fraturas por meio de análises qualitativa e quantitativa da porcentagem de fratura dúctil, respectivamente, utilizando como referência a norma ASTM E23 [16]. Entretanto, verifica-se em outros estudos [30-31] que os valores obtidos, quando se adota cada uma das diferentes definições para determinação da TTDF, são diferentes entre si. Como efeito, mensurando os valores de TTDF fundamentado nos critérios de

porcentagem de fratura dúctil qualitativo e quantitativo, apesar de também serem resultados da avaliação das faces de fratura dos corpos de prova, certamente são suscetíveis à incredulidade.

Na **Tabela 5**, são exibidas as porcentagens obtidas por ambos os critérios (qualitativo e quantitativo) e são confirmadas as significativas dissimilaridades entre eles. Bem como, quando os valores de percentual de fratura dúctil das superfícies são confrontados com os valores obtidos pelo fundamento da energia absorvida, observa-se incompatibilidade, apesar de serem alcançados por critérios diferentes. A partir da avaliação das faces de fratura, fica evidente que apenas com a visualização destas há riscos de disparidade entre os resultados, uma vez que a aparência das faces de fratura de materiais distintos pode ser semelhante.



**Fig. 7** - Macroscopia da face de fratura dos corpos de prova ensaiados ao impacto Charpy às temperaturas: (a) ambiente; (b) 0°C; (c) -20°C; (d) -40°C; (e) -60°C (aumento 5X).



**Tab. 5** - Porcentagem de fratura dúctil utilizando como referência a norma ASTM E23.

| Temperatura (°C) | % Qualitativo | % Quantitativo |
|------------------|---------------|----------------|
| Ambiente         | 50,00         | 34,73          |
| 0,0              | 50,00         | 32,21          |
| -20,0            | 40,00         | 26,28          |
| -40,0            | 40,00         | 25,29          |
| -60,0            | 20,00         | 9,68           |

Portanto, para um estudo rebuscado do micromecanismo de fratura obtendo maior confiabilidade, foram realizadas análises microscópicas das faces de fratura via MEV. Essa verificação teve por objetivo confirmar o micromecanismo de fratura observado pelo meio de macroscopia nas faces de fratura dos corpos de prova ensaiados ao impacto Charpy nas diferentes temperaturas.

As micrografias via MEV da superfície de fratura dos corpos de prova após os ensaios, executados a temperatura ambiente, -20°C e -60°C, são exibidas da **Fig. 8** a **Fig. 10** respectivamente. As figuras consistiram na exposição das superfícies subdivididas em três regiões dos corpos de prova (superior, central e inferior), ressaltando que na coluna esquerda o aumento é de 30X ou 50X e na coluna direita o aumento é de 1000X ou 2000X.

É perceptível na **Fig. 8** que a superfície contém aspecto típico de uma fratura predominantemente dúctil, a rugosidade. Outro fator característico de uma fratura dúctil suprema, as microcavidades (*dimples*), também são salientadas na superfície. Esses micromecanismos são respaldados na curva da energia absorvida em função da temperatura ajustada

pelo método da tangente hiperbólica, pois pela tal apresentaria uma fratura principalmente dúctil.

Os corpos de prova ensaiados a -20°C são os de temperatura mais próxima da TTDF<sub>EA</sub> e cujas faces de fratura obtidas foram consideradas mistas (como apresentando fraturas frágil e dúctil), o que condiz com o comportamento que se espera do material na temperatura de transição. Conforme apresentado na **Fig. 9**, que mostra em detalhe cada porção distinta da face de fratura, ou seja, onde se considerou que há tanto fratura por clivagem quanto fratura por cisalhamento.

Na **Fig. 10**, são apresentadas micrografias da superfície de fratura dos corpos de prova após o ensaio a -60°C. As características da superfície mostram uma fratura predominante consequente do micromecanismo de clivagem, o que condiz com a região dessa temperatura na curva da energia absorvida em função da temperatura ajustada pelo método da tangente hiperbólica.

3.3 Efeito da composição química

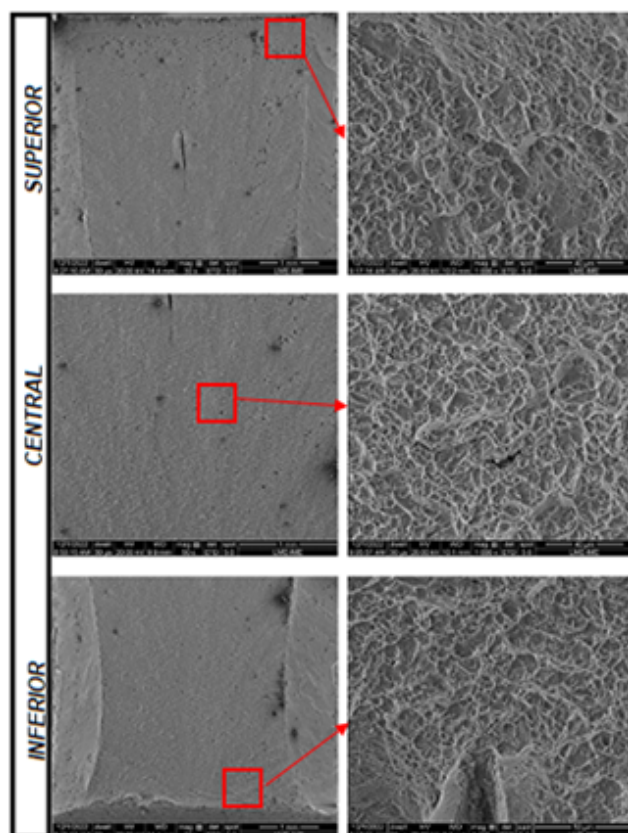
Efetuada uma análise comparativa entre o material em estudo e outro tipo de aço temperado revenido, o aço AISI 4340 perscrutado em outro trabalho [32], obteve-se a corroboração do prescrito no efeito da composição química para a curva de energia de fratura por impacto. Em demais estudos, esse efeito também é consistente com o comportamento de outros aços [33]. A TTDF do aço AISI 4340 ocorreu em 0°C determinada a 21,0 J. O teor de Mn, C, P e S do mesmo em % peso é 0,72, 0,42, 0,015 e 0,008, respectivamente [32]. Do modo que é apresentado na **Tabela 1**, o UHH-Q&T possui maior teor de Mn, induzindo a elevação da energia absorvida, no entanto

o maior teor de C alicia com maior vigor ao invés. Portanto, devido em parte a essa relação, a energia absorvida do material em estudo é menor (12,92 J).

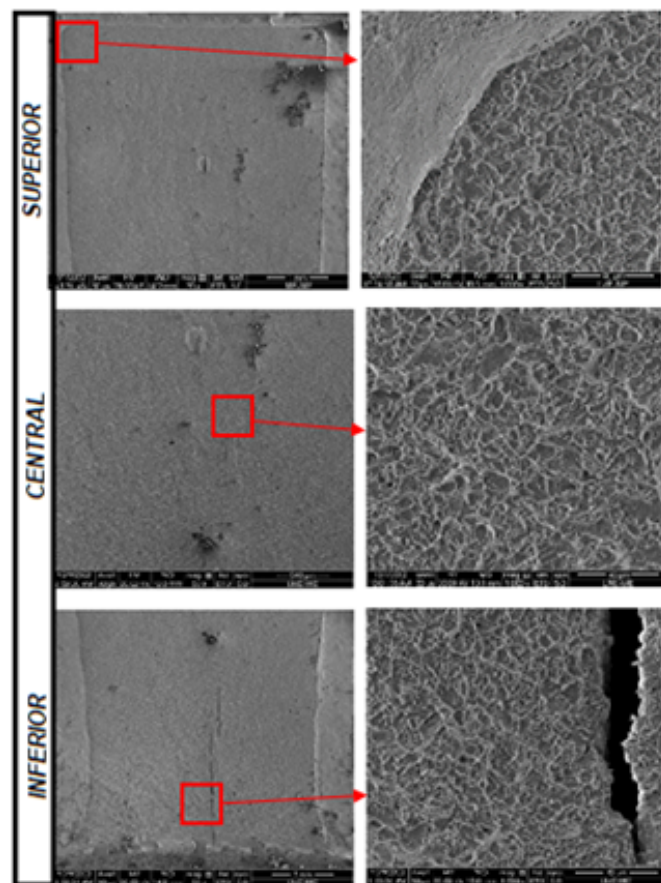
### 3.4 Correlação entre impacto Charpy e tenacidade à fratura

Tanto o ensaio Charpy quanto o ensaio de queda de peso Pellini ainda são amplamente aplicados em materiais estruturais. A ASTM padronizou ambos os ensaios, bem como uma série de abordagens relacionadas [16, 34-35]. Embora esses ensaios não tenham o rigor matemático e as capacidades preditivas dos métodos de mecânica da fratura, essas abordagens fornecem uma excelente indicação qualitativa da tenacidade do material. A vantagem desses métodos qualitativos é que são de menor custo e maior facilidade de execução do que os ensaios de mecânica da fratura [16, 34].

**Fig. 8** - Imagens via MEV de detalhes da face de fratura do corpo de prova ensaiado ao impacto Charpy à temperatura ambiente.



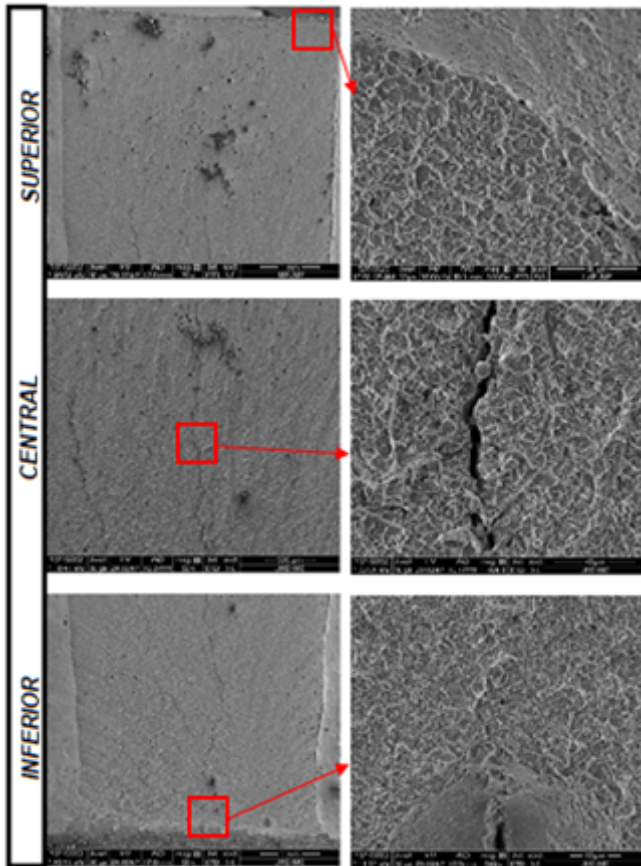
**Fig. 9** - Imagens via MEV de detalhes da face de fratura do corpo de prova ensaiado ao impacto Charpy à -20°C.



Alguns pesquisadores [36-38] correlacionaram a energia absorvida obtida no ensaio Charpy com parâmetros de tenacidade à fratura, como  $K_{Ic}$ . Algumas dessas correlações empíricas funcionam razoavelmente bem, ademais a indústria de construção naval utiliza o ensaio de queda de peso Pellini para qualificar aços para cascos de navios. No entanto, existem diferenças importantes entre esses ensaios e os ensaios de mecânica da fratura que impedem relações simples entre as medidas qualitativas e quantitativas de tenacidade.

Entre essas diferenças, pode-se mencionar que os corpos de prova dos ensaios Charpy e de queda de peso possuem entalhe inicial, enquanto os da mecânica de fratura apresentam trincas acentuadas por fadiga [16, 34].

**Fig. 10** - Imagens via MEV de detalhes da face de fratura do corpo de prova ensaiado ao impacto Charpy à  $-60^{\circ}\text{C}$ .



Na ocasião em que o material disponível não permite a confecção dos corpos de prova de impacto Charpy na medida padrão ( $10 \times 10 \times 55 \text{ mm}$ ), menores podem ser usados, como foi nesse estudo, mas os resultados obtidos em diferentes dimensões de corpos de prova não podem ser comparados diretamente. Quando forem necessários ou especificados corpos de prova Charpy com dimensões menores do que o padrão, ou seja, *sub-size*, eles poderão ser selecionados conforme o anexo A3-Additional Impact Test Specimen Configurations da norma ASTM E23 [16].

A variação, aumento ou redução da espessura e/ou largura do corpo de prova tende a modalizar o volume do metal sujeito à distorção e, por esse fator, propende também variar a energia absorvida.

Contudo, qualquer aumento de dimensão, particularmente na espessura, também tende a aumentar

o grau de restrição e, ao tender a induzir fratura frágil, pode diminuir a energia absorvida [16].

Uma correlação geral entre os valores de energia absorvida obtidos com corpos de prova de diferentes tamanhos ou formatos não é viável, mas correlações limitadas podem ser estabelecidas para fins de especificação com base em estudos especiais de materiais e corpos de prova específicos [16].

## 4. Conclusões

A partir da metodologia utilizada no ensaio de impacto Charpy combinada com a análise fractográfica, conseguiu-se obter um melhor entendimento no que diz respeito a ensaios de impacto e análise do comportamento do material, sendo possível, assim, verificar a energia absorvida em função da temperatura para os corpos de prova ensaiados em diferentes temperaturas. Pode-se afirmar que é o método mais adequado para determinar a TTDF de um aço UHH-Q&T.

Com a realização dos ensaios, averiguou-se que é possível obter propriedades mecânicas quanto à tenacidade de um material por meio de impacto. Por meio desse desenvolvimento, percebeu-se que a temperatura influencia na tenacidade do material, obtendo-se, para o corpo de prova ensaiado, uma estrutura predominante frágil em baixas temperaturas e uma estrutura dominante dúctil em temperatura ambiente, certificadas pela micrografia. Dessa maneira, pode-se determinar o material correto a ser empregado em diversas temperaturas.

Pela avaliação das faces de fratura dos corpos de prova por MEV, foi possível visualizar que nos corpos de prova ensaiados na zona de transição há regiões onde, por avaliação visual, considerou-se que havia fratura por clivagem, mas nestas também há regiões com alvéolos resultantes de deformação plástica do material, típicos de fratura dúctil. Sendo assim, os critérios qualitativo e quantitativo são duvidosos.

Os resultados mostram que a TTDF com base em  $12,92 \text{ J}$  de energia absorvida é  $-27,73^{\circ}\text{C}$ . Além disso, a temperatura na qual ocorreu transição de ductilidade nula é  $-41,83^{\circ}\text{C}$  e a transição de fragilidade nula advém na temperatura de  $-13,64^{\circ}\text{C}$ .



## Agradecimentos

Os autores agradecem a SSAB Special Steels por fornecer o material de base, os Laboratórios de Ensaios Mecânicos e de Microscopia Eletrônica de Varredura

da Seção de Engenharia de Materiais do Instituto Militar de Engenharia (IME) e o Laboratório de Caracterização de Materiais (LACAM) da Universidade Federal do Pará (UFPA) por fornecerem instalações de testes e de caracterização microestrutural para este trabalho.

## Referências

- [1] U.S. **Military Specification, MIL-DTL-46100E (MR). Armor Plate, Steel, Wrought, High-Hardness.** U.S. Army Research Laboratory, APG, MD, 9 July 2008.
- [2] RAPACKI, E.; FRANK, K.; LEAVY, B.; KEELE, M.; PRIFTI, J. **Armor steel hardness influence on kinetic energy penetration proceedings.** In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON BALLISTICS, 15., Jerusalem, 1995.
- [3] SSAB. **Armor: The steel you want between you and risk.** Sweden: SSAB, 2017.
- [4] BACKMAN, M. E.; GOLDSMITH, W. The mechanics of penetration of projectiles into targets. **International Journal of Engineering Science**, [s. l.], v. 16, p. 1-99, 1978.
- [5] PEREIRA, L. C.; BLAS, J. C. G.; GRIZA, S.; DARWISH, F. A. I. Use of instrumented Charpy testing on the fracture toughness characterization of metallic materials. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, [s. l.], v. 18, p. 1-11, 2021.
- [6] TANAKA, M.; UMEKAWA, S. On the breaking behaviour in Charpy impact bending tests. In: JAPAN CONGRESS FOR TESTING MATERIALS, 1., Kyoto, 1958.
- [7] ONO, S. Micro-time structure of impact fracture concerning Charpy test. In: JAPAN CONGRESS FOR TESTING MATERIALS, 1., Kyoto, 1958.
- [8] TAGAWA, T.; KAYAMORI, Y.; HIRA, H. Statistical scatter of fracture toughness in the ductile-brittle transition of a structural steel. **Eng. Fract. Mech.**, v. 77, n. 16, p. 3077-3086, 2010.
- [9] CHEN, S. L.; HU, J.; ZHANG, X. D. et al. High ductility and toughness of a micro-duplex medium-Mn steel in a large temperature range from -196°C to 200°C. **Journal of Iron and Steel Research International**, [s. l.], v. 22, p. 1126-1130, 2015.
- [10] GOPALAN, A.; SAMAL, M. K.; CHAKRAVARTTY, J. K. Fracture toughness evaluation of 20MnMoNi55 pressure vessel steel in the ductile to brittle transition regime: Experiment & numerical simulations. **J. Nucl. Mater.**, [s. l.], v. 465, p. 424-432, 2015.
- [11] CHAO, Y. J.; WARD, J. D.; SANDS, R. G. Charpy impact energy, fracture toughness and ductile-brittle transition temperature of dual-phase 590 steel. **Mater. Design**, [s. l.], v. 28, p. 551-557, 2007.
- [12] TANGUY, B.; BESSON, J.; PIQUES, R.; PINEAU, A. Ductile to brittle transition of an A508 steel characterized by Charpy impact test: Part I: Experimental results. **Eng. Fract. Mech.**, [s. l.], v. 72, p. 49-72, 2005.
- [13] HAUSILD, P.; NEDBAL, I.; BERDIN, C.; PRIOUL, C. The influence of ductile tearing on fracture energy in the ductile-to-brittle transition temperature range. **Materials Science and Engineering: A**, [s. l.], v. 335, p. 164-174, 2002.
- [14] ROSENFELD, A. R.; SHETTY, D. K.; SKIDMORE, A. J. Fractographic observations of cleavage initiation in the ductile-brittle transition region of a reactor-pressure-vessel steel. **Metallurgical Transactions A**, v. 14, p. 1934-1937, 1983.
- [15] TAKASHIMA, Y.; MINAMI, F. Prediction of Charpy absorbed energy of steel for welded structure in ductile-to-brittle fracture transition temperature range. **Quarterly Journal of the Japan Welding Society**, v. 38, p. 103-107, 2020.
- [16] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E23: Standard test methods for notched bar impact testing of metallic materials.** U.S.: American Society for Testing and Materials, 2018.
- [17] ZHANG, X.; QU, Y.; LI, R. Low temperature impact toughness and fracture analysis of EN-GJS-400-18-LT ductile iron under instrumented impact load. **Journal of Iron and Steel Research International**, [s. l.], v. 22, p. 864-869, 2015.
- [18] SAMAL, M. K.; CHAKRAVARTTY, J. K.; SEIDENFUSS, M.; ROOS, E. Evaluation of fracture toughness and its scatter in the DBTT region of different types of pressure vessel steels. **Engineering Failure Analysis**, v. 18, p. 172-185, 2011.
- [19] DIETER, G. E. **Mechanical Metallurgy.** 2. ed. New York: McGraw-Hill Book Company, 1981.



- [20] LEACH, P. W.; WOODWARD, R. L. The influence of microstructural anisotropy on the mode of plate failure during projectile impact. **J. Mat. Sci.**, [s. l.], v. 20, p. 854-858, 1985.
- [21] MANGANELLO, S. J.; ABBOTT, K. H. Metallurgical factors affecting the ballistic behaviour of steel targets. **J. Mat.**, [s. l.], v. 7, p. 231-239, 1972.
- [22] SHOWALTER, D. D. et al. STANDARD, Australian Defence. DEF (AUST) 8030. Rolled Armour Plate, Steel (3-35 mm). **Army Research Laboratory**, Adelphi, 2005.
- [23] HERZIG, N ; MEYER, L. W.; PURSCHE, F., HUSING, K. Relation between dynamic strength and toughness properties and the behavior under blast conditions of high strength steels. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON IMPACT ENGINEERING, 7., 2010. **Anais [...]**. Warsaw: MABS, 2010. p. 278-284.
- [24] BRITISH STANDARD. BS EN 10029: Hot-rolled steel plates 3 mm thick or above – tolerances on dimensions and shape. UK: British Standard, 2010.
- [25] BRITISH STANDARD. **BS EN 10163-2**: Delivery requirements for surface condition of hot-rolled steel plates, wide flats and sections — Part 2: Plate and wide flats. UK: British Standard, 2004.
- [26] SSAB. **General product information strenx, hardox, armox and toolbox – UK**. [s. l.]: SSAB, 2018.
- [27] ERICKSONKIRK, M.; SHAIKH, A.; ERICKSONKIRK, M. Insights and observations arising from curve-fitting the Charpy V-notch and tensile data contained within the United States' light water reactor surveillance database. ASME 2008 PRESSURE VESSELS AND PIPING CONFERENCE. 2008. Chicago, 2008. p. 389-396.
- [28] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E2142**: Standard test methods for rating and classifying inclusions in steel using the scanning electron microscope. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials, 2015.
- [29] FOLCH, L.; BURDEKIN, F. M. Application of coupled brittle-ductile model to study correlation between Charpy energy and fracture toughness values. **Eng. Fract. Mech.**, [s. l.], v. 63, p. 57-80, 1999.
- [30] ZHAO, Y. J.; SU, Y. M.; LIU, M.; HU, Z. L.; TANG, P. Ductile-to-brittle transition and impact fracture behavior of 3Mn–Si–Ni low carbon martensitic steel. **Strength of Materials**, [s. l.], v. 51, p. 291-299, 2019.
- [31] TAKASHIMA, Y.; ITO, Y.; LU, F.; MINAMI, F. Fracture toughness evaluation for dissimilar steel joints by Charpy impact test. **Welding in the World**, [s. l.], v. 63, p. 1243-1254, 2019.
- [32] DUARTE, A. S. **Metodologia básica para a produção de materiais de referência para a calibração indireta de máquinas pendulares de impacto Charpy**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2006.
- [33] ROE, G. J.; BRAMFITT, B. L. **Notch toughness of steels. ASM International, Metals Handbook**. Materials Park: ASM Handbook, 1990.
- [34] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E208**: Standard test method for conducting drop-weight test to determine nil-ductility transition temperature of ferritic steels. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials, 2020.
- [35] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E436-03**: Standard test method for drop-weight tear tests of ferritic steels. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials, 2021.
- [36] TEERI, T.; KUOKKALA, V.-T.; SIITONEN, P.; KIVIKYTÖ-REPONEN, P.; LIIMATAINEN, J. Impact wear in mineral crushing. **Proceedings of the Estonian Academy of Sciences Engineering**, [s. l.], v. 12, p. 408-418, 2006.
- [37] ZAMBRANO, O. A. A review on the effect of impact toughness and fracture toughness on impact-abrasion wear. **Journal of Materials Engineering and Performance**, Materials Park, v. 30, p. 7101-7116, 2021.
- [38] WALLIN, K. A simple theoretical Charpy-V-K correlation for irradiation embrittlement. In: MARRIOT, D. L.; MAGER, T. R.; BAMFORD, W. H. (Eds.). **Innovative Approaches to Irradiation Damage and Fracture Analysis**. v. 170. New York: ASME – American Society of Mechanical Engineers, 1989. p. 93-100.

# Estudo da composição, estrutura e efeito da absorção de água em cascos bovinos oriundos da região Nordeste

Wendell Bruno Almeida Bezerra<sup>1\*</sup>, Ulisses Oliveira Costa<sup>1</sup>, Fabio da Costa Garcia Filho<sup>1</sup>, Sergio Neves Monteiro<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Militar de Engenharia (IME).

Praça General Tibúrcio, 80, 22290-270, Praia Vermelha, Rio de Janeiro, RJ, Brasil,

\*wendellbez@ime.eb.br

**RESUMO:** Ao longo de milhares de anos, os materiais naturais evoluíram, desenvolvendo estruturas hierárquicas complexas e multifuncionais. Um exemplo disso, os cascos bovinos, são materiais queratinosos diferenciados de outros tipos de cascos cuja estrutura e composição ainda não são tão conhecidas como a dos cascos equinos. Dessa forma, o presente trabalho se propôs a investigar a influência da água absorvida na estrutura e composição de cascos bovinos oriundos da região Nordeste do Brasil. Os cascos foram avaliados através de análises de difração de raios X (DRX), espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Pode-se observar o efeito da água na matriz de queratina amorfa dos cascos através das análises de DRX e FTIR, bem como identificar diferentes zonas e dimensões dos túbulos na estrutura através das imagens de MEV. Os resultados apresentam um ponto de partida para a correlação entre a estrutura e os mecanismos de absorção de impacto nesses materiais.

**PALAVRAS-CHAVE:** Queratina. Cascos bovinos. Absorção de água. Composição. Estrutura.

**ABSTRACT:** Over thousands of years natural materials have evolved to complex and multifunctional hierarchical structures. An example of this, bovine hooves are keratinous materials differentiated from other types of hooves whose structure and composition are not yet as well-known as that of equine hooves. Thus, the present work aimed to investigate the influence of absorbed water on the structure and composition of bovine hooves from the Northeast region of Brazil. The hulls were evaluated using X-ray diffraction analysis (XRD), Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) and scanning electron microscopy (SEM). The effect of water on the amorphous keratin matrix of the hooves can be observed through DRX and FTIR analyses, as well as identifying different zones and dimensions of the tubules in the structure through SEM images. The results present a starting point for the correlation between structure and impact absorption mechanisms in these materials.

**KEYWORDS:** Keratin. Bovine hooves. Water absorption. Composition. Structure.

## 1. Introdução

Muitos materiais biológicos desenvolveram-se de tal modo a apresentar estruturas multifuncionais e capacidade de absorver consideráveis quantidades de energia sem fraturar. Podem ser citadas funções como proteção (*e.g.*: concha de molusco, ossos), defesa e agressão (*e.g.*: garras, dentes, presas, chifres e galhadas), suporte (*e.g.*: ossos, concha de molusco e cascos) e mastigação (*e.g.*: dentes) [1]. Esses materiais são compostos por diferentes componentes estruturais com características químicas e físicas diferentes [2]. Dentre esses componentes, destacam-se os constituídos à base de queratina [3].

A queratina é formada por cadeias de polipeptídios. Esse componente apresenta variantes que podem ser encontradas tanto em mamíferos, constituindo cabelo, unhas, cascos, chifres e camada epidérmica da pele, quanto em répteis e aves, em suas garras, escamas, penas e bicos [4]. Inicialmente, alguns desses materiais atraem maior interesse por apresentarem a capacidade de absorver uma considerável quantidade de energia e resistir ao impacto (*e.g.*, cascos e chifres) [1, 3–5].

As queratinas podem ser classificadas como tipos  $\alpha$  e  $\beta$ . Ambas apresentam uma estrutura do tipo matriz-filamentos, observada em cada tipo na forma de: filamentos intermediários (FIs) de 7 nm de diâmetro, no caso da  $\alpha$ -queratina, e filamentos de 3 nm de diâ-

metro na  $\beta$ -queratina, ambos embutidos em uma matriz de queratina amorfa. [4]. Nesse sentido, a água desempenha um papel de fundamental importância nas propriedades mecânicas dos materiais biológicos estruturais. Similarmente, as propriedades mecânicas da  $\alpha$ -queratina e da  $\beta$ -queratina são influenciadas pelo conteúdo de água.

De modo geral, a presença de água define as características estruturais e as propriedades físicas das proteínas e substâncias orgânicas atuando como plastificante nos materiais biológicos, aumentando sua ductilidade e diminuindo a tenacidade. Dessa forma, sem água, os materiais biológicos perdem suas propriedades mecânicas originais e tornam-se mais frágeis [2]. O mesmo ocorre para a queratina: conforme se aumenta a umidade, a rigidez e a resistência diminuem, enquanto a tensão de ruptura aumenta [4].

Através da difração de raios X e estudos experimentais, trabalhos anteriores revelaram que se pode considerar as proteínas da matriz sensíveis à água, enquanto os FIs são cristalinos e não são afetados mecanicamente pela umidade [6-10]. De modo geral, pode-se estender isso aos materiais queratinosos, visto que os FIs não se alteram nas diferentes queratinas rígidas dos mamíferos [6]. Diferentes modelos foram propostos para explicar como ocorre a interação entre as moléculas de água e as proteínas da matriz.

Segundo os modelos propostos:

- a. A água pode agir como um agente de inchamento, formando uma ligação cruzada com as cadeias, resultando em uma redução na interação entre as cadeias e um aumento no espaço intermolecular [10];
- b. A água pode quebrar/substituir as ligações secundárias presentes entre as proteínas ricas em glicina/tirosina na fase matriz, como as ligações de hidrogênio, resultando em uma maior mobilidade das proteínas [7,9];
- c. A água pode formar uma rede tridimensional de queratina-moléculas de água que age como um plastificante, resultando em menor rigidez e maior mobilidade segmental da estrutura molecular da matriz [6,10].

Os materiais biológicos queratinosos, que apresentam diferentes estruturas tendo como compo-

nente principal a queratina, possuem suas propriedades diretamente ligadas à sensibilidade de tal componente. Quando desidratados, esses materiais perdem suas propriedades mecânicas originais e tornam-se mais frágeis. Dessa forma, para se aferir corretamente as propriedades mecânicas dos materiais biológicos, é de suma importância levar em consideração o grau de hidratação [2].

Todavia, antes de conseguir aplicar as estruturas biológicas na fabricação de materiais bioinspirados, é necessário um conhecimento aprofundado das relações entre estrutura e propriedades nesses materiais complexos. Vários estudos têm se dedicado a esse paradigma, em especial cascos equinos e chifres de carneiros-selvagens americanos [5, 11,12]. Além destas, alguns materiais de outras espécies tiveram suas estruturas e propriedades analisadas, como os cascos bovinos [13-16], porém aplica-se pouco foco na relação entre estrutura e comportamento dinâmico.

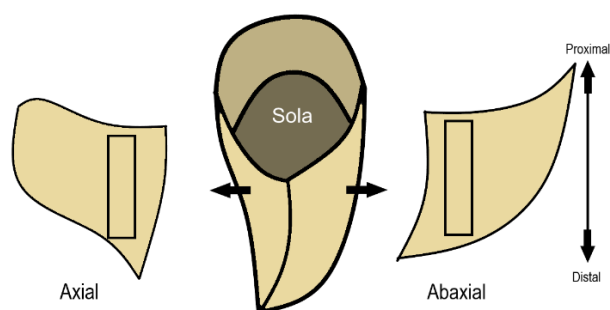
Com base na literatura, a análise dessas características em materiais biológicos queratinosos demonstra-se útil no desenvolvimento de sistemas e estruturas bioinspirados dos quais se espera desempenhos cada vez melhores com os subseqüentes aprimoramentos na tecnologia de processamento e produção de materiais.

Dessa forma, o objetivo do presente trabalho é estudar as relações entre composição, estrutura e efeito da água em materiais biológicos queratinosos, como cascos bovinos, visando possibilitar um ponto de partida para o desenvolvimento de novos materiais bioinspirados resistentes ao impacto.

## 2. Materiais e métodos

Cascos de espécies de bovinos oriundos do Nordeste brasileiro foram estudados para análise de sua composição e estrutura. Os cascos de diferentes animais foram obtidos no matadouro municipal da cidade de Juazeiro do Norte, no Ceará. Os cascos foram lavados e, posteriormente, deixados para secagem à temperatura ambiente, sem controle específico de umidade. A Figura 1 apresenta o casco bovino com suas respectivas regiões anatômicas, consideradas na preparação das amostras.

**Fig. 1** - Posições anatômicas dos cascos e regiões de amostragem. Fonte: Autoria própria.



## 2.1 Absorção de água

Com o objetivo de avaliar o tempo necessário até a hidratação completa dos cascos após imersão, foram realizados testes de absorção de água. Por ausência de uma norma específica para materiais naturais, os testes foram baseados na norma ASTM D570-98(2018). Foram preparadas cinco (5) amostras de duas regiões distintas da parede abaxial dos cascos bovinos, caracterizando assim dois grupos: abaxial-proximal (AB-P) e abaxial-distal (AB-D). As amostras foram pesadas e imersas em água deionizada e novas pesagens foram realizadas após períodos de imersão de: cinco (5min), dez (10min), vinte (20min) e trinta (30min) minutos, e uma (1h), duas (2h), três (3h), quatro (4h), vinte e quatro (24h), quarenta e oito (48h), setenta e duas (72h) e noventa e seis (96h) horas. Após o tempo final de imersão, as amostras foram separadas, pesadas, e o teor de umidade delas foi avaliado, seguindo o descrito em trabalhos anteriores [14,16]. As amostras foram

colocadas em uma estufa a 70°C, durante um período de sete (7) dias. O teor de umidade (TU %) pode ser determinado através da Equação 1:

$$TU \% = \frac{\text{massa úmida} - \text{massa seca}}{\text{massa úmida}} \times 100\% \quad (1)$$

## 2.1 Difração de raios X (DRX)

As amostras foram preparadas de duas regiões distintas da parede abaxial, nomeadamente abaxial-proximal (AB-P) e abaxial-distal (AB-D). Uma amostra de cada grupo foi submetida a cada uma das duas condições distintas de hidratação: condicionada à temperatura ambiente (SA) e totalmente hidratadas (100). Além disso, na amostra AB-D foram avaliadas as superfícies da parede: interna (PI) e externa (PE). Dessa forma, as amostras foram nomeadas de acordo com a Tabela 1.

As análises foram realizadas em um difratômetro de raios X, modelo X'Pert Pro Panalytical, disponível no Instituto Militar de Engenharia (IME), utilizando fonte de radiação CoK $\alpha$  (1,790307 Å). Os parâmetros utilizados foram: voltagem de 40 kV, corrente de 40 mA, degrau de 0,04 grau. Os espectros foram obtidos para valores de 2 $\theta$  de 5 a 50°, com base na literatura encontrada [18,19].

Através do *software* OriginPro 2019, os dados obtidos foram submetidos à remoção de ruído, pelo método de Savitzky-Golay, e as curvas foram ajustadas, com deconvolução dos halos, a fim de determinar com maior precisão a posição dos picos.

**Tab. 1** - Nomenclatura das amostras para análise de DRX nas diferentes condições estudadas

| Região                  | Hidratação | Superfície   | Nomenclatura |
|-------------------------|------------|--------------|--------------|
| Abaxial-distal (AB-D)   | SA         | Externa (PE) | AB-D-SA-PE   |
|                         |            | Interna (PI) | AB-D-SA-PI   |
|                         | 100        | Externa (PE) | AB-D-100-PE  |
|                         |            | Interna (PI) | AB-D-100-PI  |
| Abaxial-proximal (AB-P) | SA         | Externa      | AB-P-SA      |
|                         | 100        | -            | AB-P-100     |

Fonte: Autoria própria



## 2.2 Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)

Para melhor compreender o efeito da hidratação na estrutura química dos componentes dos cascos, foram realizadas análises de espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) com diferentes condições das amostras. Estas foram preparadas de duas regiões distintas da parede abaxial, denominadas abaxial-proximal (AB-P) e abaxial-distal (AB-D). De cada grupo de região, foram preparadas duas condições de hidratação: com secagem à temperatura ambiente (SA) e totalmente hidratadas (100).

As análises foram realizadas em um equipamento PerkinElmer Frontier FT-IR/FIR, no modo de transmitância com pastilha de KBr, com resolução de 4  $\text{cm}^{-1}$ , utilizando uma faixa de números de onda de 4.000 a 400  $\text{cm}^{-1}$ . A escolha do modo de transmitância utilizando pastilhas de KBr foi feita para comparar os espectros obtidos com os reportados para outros materiais queratinosos e membranas da queratina dos cascos [18,19].

## 2.3 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Visando caracterizar a morfologia da superfície da parede dos cascos e sua estrutura interna, foram realizadas análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV). Visto que os materiais não são condutores de eletricidade, eles foram submetidos a um recobrimento metálico superficial utilizando o equipamento LEICA, modelo EM ACE600, e as análises foram realizadas em um equipamento modelo Quanta FEG 250, da FEI, ambos disponíveis no IME.

# 3. Resultados e discussão

## 3.1 Absorção de água

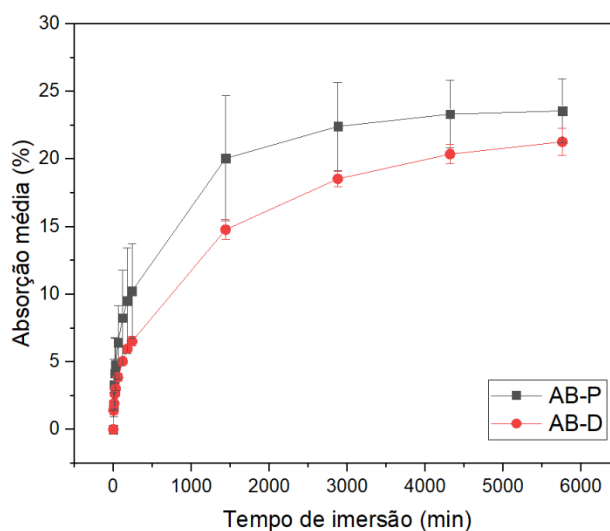
Sabe-se que o teor de umidade é um dos fatores que afetam as propriedades mecânicas dos materiais biológicos estruturais, em especial da parede dos cascos [14]. Sendo assim, visando agilizar o procedimento de preparação das amostras para os trabalhos

futuros, foram realizados testes de absorção de água nas duas regiões distintas da parede abaxial dos cascos bovinos.

A Figura 2 apresenta os aumentos percentuais médios em peso observados nas amostras após os intervalos de tempo de imersão propostos. Observou-se uma absorção acelerada nos primeiros minutos com subsequente redução da taxa de absorção, devido à saturação de água na estrutura do material [20]. Comportamentos similares foram observados em outros materiais biológicos estruturais [9,21]. Além disso, é possível observar uma tendência assintótica dos pontos a um patamar a partir de três dias (4.320 min) de imersão. No caso dos chifres de órix, Kitchener (1987) relata a hidratação total do material, representada pelo patamar, a partir de 3 dias, enquanto, para os cascos equinos, a hidratação completa ocorre após 5 dias [9].

Apesar da aparente tendência a uma maior absorção, em média, por parte da parede abaxial-proximal, não foram observadas diferenças significativas entre as duas regiões. Após quatro dias de imersão (5.760 min), foram observados valores médios de  $23,58 \pm 2,37\%$  para a região abaxial-proximal (AB-P) e  $21,28 \pm 1,00\%$  para a região abaxial-distal (AB-D).

**Fig. 2** - Absorção média de água (%) para cada região da parede abaxial dos cascos bovinos: proximal e distal.



Trabalhos anteriores estudaram o efeito da umidade relativa atmosférica no teor de umidade de diferentes cascos, especialmente os de único dígito, como de cavalos e burros [9,22]. Em ambos os casos, as curvas de teor de umidade *versus* umidade relativa atmosférica demonstram um crescimento exponencial do nível de hidratação dos cascos com o aumento na umidade relativa ambiente.

Baillie e colaboradores (2000) propuseram que a melhor forma de simular os níveis de hidratação presentes nos cascos *in vivo* seria através da imersão em meio aquoso. Dessa forma, espera-se que, pela presença dos túbulos na estrutura interna da parede, ocorra um efeito direto da capilaridade na hidratação obtida. Todavia, nos cascos equinos, observou-se que não houve a formação de gradientes de hidratação (*i.e.*, maior hidratação na região distal) esperados para esse caso [20]. Ao contrário disso, observou-se

uma taxa de desidratação maior na região distal devido à presença das aberturas nos túbulos.

Os valores médios e os respectivos desvios-padrões dos teores de umidade obtidos para as amostras dos dois grupos estudados são apresentados na Tabela 2. Na literatura, podem ser encontrados valores para os cascos bovinos que variam de 3,11 a 35,50 %p/p H<sub>2</sub>O, dependendo das condições de hidratação ou desidratação empregadas [14,16]. Os valores encontrados no presente trabalho estão bem próximos dos reportados por Wang e colaboradores (2020), de 28,05 e 27,15%. Além disso, foi observada uma diferença significativa (*i.e.*, intervalo de confiança = 95%) nos valores do teor de umidade das duas regiões estudadas, o que é similar ao reportado para os cascos equinos [9]. O teor de umidade dos cascos secos na umidade ambiente (SA) foi de 10,03 e 11,32% para as regiões abaxial-distal (AB-D) e abaxial-proximal (AB-P), respectivamente.

**Tab. 2 -** Teor de umidade médio das amostras após hidratação

| Amostra  | Teor de umidade médio (%p/p H <sub>2</sub> O) | Desvio-padrão |
|----------|-----------------------------------------------|---------------|
| AB-P-100 | 25,05                                         | 1,50          |
| AB-D-100 | 22,52                                         | 0,80          |

### 3.2. Difração de raios X (DRX)

A estrutura física das queratinas é estudada há bastante tempo, sendo amplamente reportada na literatura [4,8]. Através da difração de raios X, é possível identificar três padrões característicos: padrão  $\alpha$ , padrão  $\beta$  e padrão de penas, além do padrão amorfo. Na maioria dos mamíferos, a queratina encontrada apresenta o padrão  $\alpha$  [4], exibindo dois espaçamentos típicos: um relacionado à distância entre as moléculas que compõem a  $\alpha$ -hélice, de 9,80 Å, e outro relacionado ao passo entre as duas moléculas da  $\alpha$ -hélice, de 5,15 Å [23].

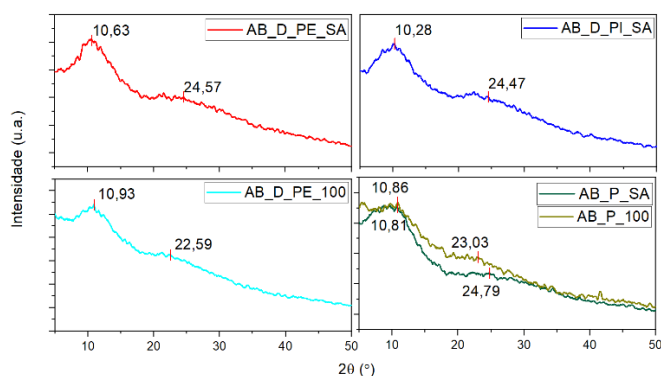
Os difratogramas obtidos para as amostras da parede abaxial do casco bovino, das regiões proximal e distal nas duas condições de hidratação, são apresentados na Figura 3. Através do ajuste das curvas, foi possível observar dois halos característicos nas

diferentes amostras. A presença de halos ao invés de picos está associada tanto ao fato de a parede dos cascos apresentarem uma matriz de queratina amorfa quanto pelo fato dos filamentos intermediários (FIs) apresentarem uma ordem de cristalinidade no nível nanométrico.

O primeiro halo foi encontrado em ângulos de Bragg ( $2\theta$ ) que variam entre 10,28 e 10,93°. A partir desses valores, os espaçamentos interplanares puderam ser identificados, conforme exposto na Tabela 3, resultando em um espaçamento médio de  $9,60 \pm 0,24$  Å. Não foi identificada uma variação significativa entre a estrutura das paredes interna (AB\_D-PI-SA) e externa (AB\_D-PE-SA) dos cascos, ou entre as regiões distal e proximal. O segundo halo foi encontrado em ângulos de Bragg ( $2\theta$ ) de 22,59 a 24,79°. Os espaçamentos relacionados a esses ângulos são apresentados na Tabela 3. Pôde-se observar um espaçamento

médio de  $4,33 \pm 0,18$  Å, bem próximo do que é reportado para outros materiais queratinosos, conforme mostrado na mesma tabela.

**Fig. 3** - Difratomogramas obtidos para as amostras das diferentes regiões do casco e em diferentes condições de hidratação.



A fim de se evitar a variabilidade inerente dos materiais naturais, as mesmas amostras foram avaliadas nas duas condições de hidratação, secas ao ambiente (SA) e imersas (100). Dessa forma, a comparação das duas condições permitiu o melhor entendimento da influência da hidratação na estrutura física dos cascos. Observou-se uma leve tendência à diminuição do espaçamento relacionado ao primeiro halo: de 9,66 para 9,40 Å na região distal (AB\_D), e de 9,50 para 9,46 Å na região proximal. De modo oposto, uma tendência ao aumento foi observada no espaçamento referente ao segundo halo: de 4,21 para 4,57 Å na região distal (AB\_D), e de 4,17 para 4,48 Å na região proximal.

Acredita-se que esses halos estão diretamente associados aos espaçamentos reportados para a estrutura da  $\alpha$ -hélice da queratina [8,19]. Os resultados encontrados reforçam a teoria de que as moléculas de água podem substituir ligações secundárias, como as de hidrogênio, presentes entre as proteínas ricas em glicina/tirosina na fase matriz [7,9]. A introdução das moléculas de água na estrutura gera um aumento na distância do passo da  $\alpha$ -hélice, resultando em um aumento nos espaçamentos observados em ambas as regiões no segundo halo, o que sugere a diminuição do empacotamento da estrutura cristalina da queratina nos FIs.

**Tab. 3** - Espaçamento interplanar das amostras analisadas no presente trabalho e de materiais queratinosos reportados na literatura

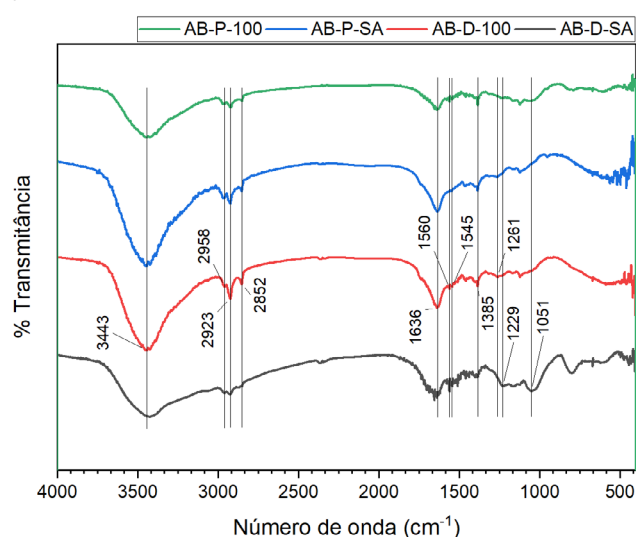
| Material                      | d (Å) | Referência                     |
|-------------------------------|-------|--------------------------------|
| AB_D_PE_SA                    | 4,21  | Presente trabalho (PT)         |
|                               | 9,66  |                                |
| AB_D_PI_SA                    | 4,22  |                                |
|                               | 9,99  |                                |
| AB_D_PE_100                   | 4,57  |                                |
|                               | 9,40  |                                |
| AB_P_SA                       | 4,17  |                                |
|                               | 9,50  |                                |
| AB_P_100                      | 4,48  |                                |
|                               | 9,46  |                                |
| Lã                            | 4,35  | Wu e colaboradores (2017)      |
| Queratina pura                | 4,46  |                                |
| Queratina de cascos bovinos   | 4,62  | Valkov e colaboradores (2020)  |
| Queratina de cabelos          | 4,48  |                                |
| Queratina de unhas            | 4,27  |                                |
| Padrão da $\alpha$ -queratina | 5,15  | Fraser, MacRae e Rogers (1972) |
|                               | 9,80  |                                |

### 3.3. Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)

A composição da parede dos cascos bovinos e o efeito da hidratação neles podem ser avaliados através do estudo da estrutura das moléculas que compõem o material pela espectroscopia no infravermelho. Os espectros obtidos para as amostras extraídas das regiões proximal e distal da parede abaxial dos cascos, nas duas condições de hidratação, secas e hidratadas, são apresentados na Figura 4. Pode-se observar a presença de bandas comuns a todas as amostras, com maior ou menor intensidade de transmitância associada.

Destacam-se as bandas encontradas nas frequências entre 3.600 e 3.200  $\text{cm}^{-1}$ , relacionadas às vibrações de estiramento de N-H e O-H; entre 2.958 e 2.852  $\text{cm}^{-1}$ , referentes às vibrações de estiramento de C-H; e de 1.636  $\text{cm}^{-1}$ , associada às vibrações de estiramento de C=O e C-N presentes nas amidas I [19].

**Fig. 4** - Espectros de infravermelho das amostras extraídas das diferentes regiões da parede abaxial dos cascos bovinos, nas diferentes condições de hidratação estudadas



Além disso, foram observadas bandas em 1.560 e 1.545  $\text{cm}^{-1}$  que estão associadas ao modo de vibração de deformação angular de N-H e de estiramento de C-N e C-C das amidas II [19,24]. A Tabela 4 apre-

senta, resumidamente, as frequências relacionadas às principais bandas observadas, os modos de vibração associados e os valores reportados na literatura para outras estruturas queratinosas.

A principal diferença observada entre as regiões proximal e distal da parede dos cascos está relacionada à intensidade da banda presente em 1.051  $\text{cm}^{-1}$ . Essa banda está associada às ligações S-C presentes na cisteína que compõe a queratina [24]. Dessa forma, acredita-se que a maior intensidade da banda observada na região distal pode estar associada a uma maior quantidade desse aminoácido na estrutura.

Em relação à condição de hidratação, foi possível observar um considerável aumento na intensidade da banda de O-H em 3.443  $\text{cm}^{-1}$ , o que está diretamente relacionado ao nível de umidade das amostras [19]. Além disso, observando a razão entre as intensidades das bandas características de C=O e de N-H, pode-se verificar uma diminuição na intensidade desta em relação à primeira com o aumento do teor de umidade das amostras [25]. É possível observar também uma alteração na razão de intensidades das bandas de 1.636 e 3.443  $\text{cm}^{-1}$ , após a hidratação das amostras. A maior intensidade na banda de 1.636  $\text{cm}^{-1}$ , observada nas amostras hidratadas, pode estar associada à ocorrência mais frequente de ligações de hidrogênio [26]. No caso dos chifres de carneiro selvagem [25], reportou-se também uma variação na posição das bandas que foi associada ao aumento do teor de umidade, todavia esse fenômeno não foi observado no presente estudo.

**Tab. 4** - Frequências das bandas de absorção observadas nas amostras estudadas e em outros materiais queratinosos estudados na literatura

| Material                 | Tipo de vibração                                                  | N.º de onda ( $\text{cm}^{-1}$ ) | Ref.  |
|--------------------------|-------------------------------------------------------------------|----------------------------------|-------|
| Parede de cascos bovinos | Estiramento de N-H e O-H                                          | 3.600-3.200                      | Autor |
|                          | Estiramento de C-H                                                | 2.958-2.852                      |       |
|                          | Estiramento de C=O e C-N de amidas I                              | 1.636                            |       |
|                          | Deformação angular de N-H e estiramento de C-N e C-C de amidas II | 1.560-1.530                      |       |
|                          | Deformação angular de C-H e estiramento de $-\text{CH}_3$         | 1.385                            |       |



| Material                            | Tipo de vibração                                                  | N.º de onda (cm <sup>-1</sup> ) | Ref.  |
|-------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|---------------------------------|-------|
| <b>Parede de cascos bovinos</b>     | Estiramento de C-N e deformação angular de C=O de amidas III      | 1.260-1.230                     | Autor |
|                                     | Característica de cisteína                                        | 1.070-1.040                     |       |
| <b>Queratina de cascos caprinos</b> | Estiramento de N-H e O-H                                          | 3.650-3.250                     | [27]  |
|                                     | Característica de amidas I                                        | 1.665-1.610                     |       |
|                                     | Característica de amidas II                                       | 1.550-1.520                     |       |
| <b>Queratina de cascos bovinos</b>  | Estiramento de N-H de amidas A e O-H de hidratação                | 3.355-3.295                     | [19]  |
|                                     | Estiramento de C=O e C-N de amidas I                              | 1.650                           |       |
|                                     | Deformação angular de N-H e estiramento de C-N e C-C de amidas II | 1.530                           |       |
|                                     | Estiramento de C-N e deformação angular de C=O de amidas III      | 1.230                           |       |
| <b>Parede de cascos caprinos</b>    | Estiramento de N-H e O-H                                          | 3.400                           | [24]  |
|                                     | Estiramento de C-H                                                | 2.960-2.870                     |       |
|                                     | Estiramento de CO de amidas I                                     | 1.655                           |       |
|                                     | Estiramento de CN e deformação angular de NH de amidas II         | 1.540-1.520                     |       |
|                                     | Deformação angular de C-H e estiramento de -CH <sub>3</sub>       | 1.387                           |       |
|                                     | Estiramento de CN e deformação angular de NH de amidas III        | 1.238                           |       |
|                                     | Característica de -S-C                                            | 1.051                           |       |
|                                     | Característica de S=O                                             | 1.076                           |       |

### 3.4 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

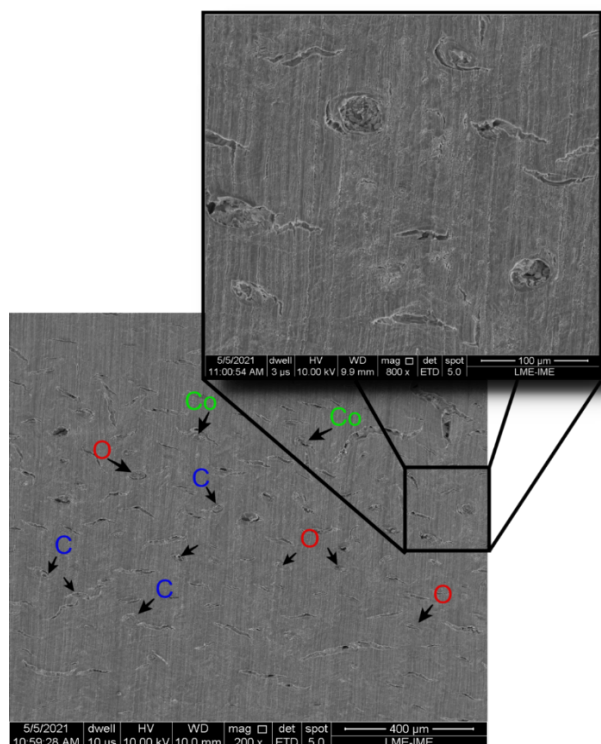
Com o objetivo de melhor entender a estrutura interna do material, amostras de diferentes regiões da parede abaxial dos cascos bovinos foram estudadas através de microscopia eletrônica de varredura (MEV). As amostras lixadas das regiões distal, intermediária e abaxial dos cascos foram observadas e suas micrografias são apresentadas a seguir.

A Figura 5 apresenta micrografias obtidas em diferentes aumentos da seção transversal da região proximal da parede dos cascos bovinos. É possível

observar a presença da abertura da estrutura dos túbulos, alguns selecionados e indicados por setas. Essa estrutura é bem conhecida e reportada em diversos materiais queratinosos, inclusive nos cascos bovinos [4,14,16,28–30]. Um dos fatores importantes a ser considerado é a quantidade desses componentes presentes em determinada área, conhecida por densidade de túbulos (mm<sup>-2</sup>). A importância desse fator está associada principalmente ao teor de umidade do material, visto que quanto menor a densidade de túbulos, maior a quantidade de material intertubular e, conseqüentemente, maior o teor de umidade [28].

Ainda na Figura 5, podem-se observar túbulos com formatos variados, como circulares, ovais e colapsados, similarmente ao reportado na literatura [29].

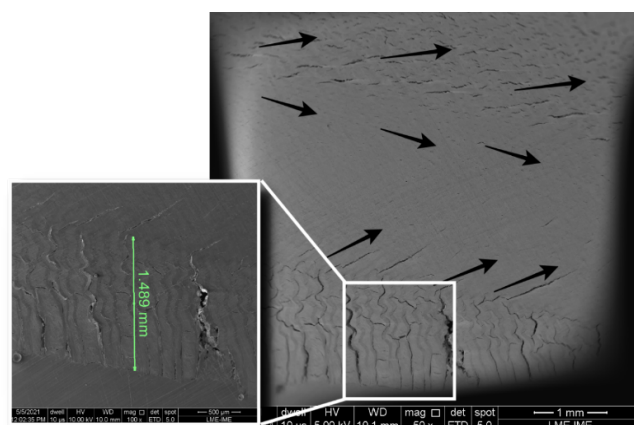
**Fig. 5** - Micrografia da seção transversal da parede dos cascos na região proximal, evidenciando a presença de túbulos circulares (C), ovais (O), colapsados (Co) e trincas no material intertubular



Em todas as regiões estudadas, pode-se identificar quatro zonas distintas: lamelar, na parede interna; interna; intermediária, dividida em duas outras com formatos dos túbulos e orientações dos queratinócitos distintos; e externa, com túbulos colapsados. Essa divisão é bastante conhecida e reportada na literatura, todavia há escassez de informações sobre a orientação dos queratinócitos na matriz intertubular. A Figura 6 apresenta a parede no total, sendo a zona lamelar destacada pelo quadrado, com 1,49 µm de extensão na região distal. As setas indicam a orientação do material intertubular, que pôde ser identificada pela direção das trincas, decorrentes do corte das amostras. No caso dos cascos equinos, as trincas seguem a orientação dos contornos das células de queratina do material intertubular [5].

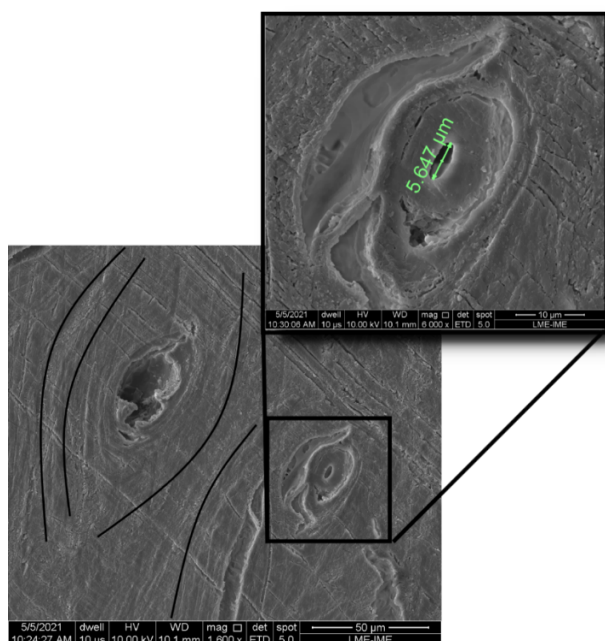
Esse fenômeno parece ocorrer também nos cascos bovinos aqui estudados, conforme ilustrado pela direção das setas. Dessa forma, pode-se identificar a zona interna, encontrada imediatamente após a zona lamelar, e caracterizada pela ausência de túbulos, seguida de uma região intermediária subdividida pelas diferentes orientações dos FIs [14,30]. A quarta e última zona é a mais próxima da parede externa e parece apresentar túbulos colapsados em sua maior parte.

**Fig. 6** - Micrografia da seção transversal da parede dos cascos na região distal, evidenciando as quatro zonas observadas ao longo da parede e as direções de orientação dos FIs no material intertubular



A Figura 7 apresenta uma micrografia da seção transversal da parede dos cascos na região intermediária, entre as regiões distal e proximal. É possível observar dois túbulos adjacentes de diâmetros aparentemente distintos, porém de formato elíptico. Em função do formato bastante irregular do túbulo à esquerda, acredita-se que houve um arrancamento da região central do túbulo durante a preparação da amostra. Além disso, pode-se observar na figura a interface presente no material intertubular entre o que seriam as duas células de queratina. A estrutura em camadas proposta para os túbulos pôde ser evidenciada pela delaminação observada na região magnificada da Figura 7, que apresenta o diâmetro do túbulo (*i.e.*, 5,65 µm). Pode-se ver claramente a separação das camadas adjacentes ao lúmen do túbulo, com um pequeno feixe de material intertubular unindo as camadas.

**Fig. 7** - Micrografia da seção transversal da parede dos cascos na região intermediária, evidenciando a região da interface entre as células de queratina e as dimensões de um dos túbulos observados nessa região

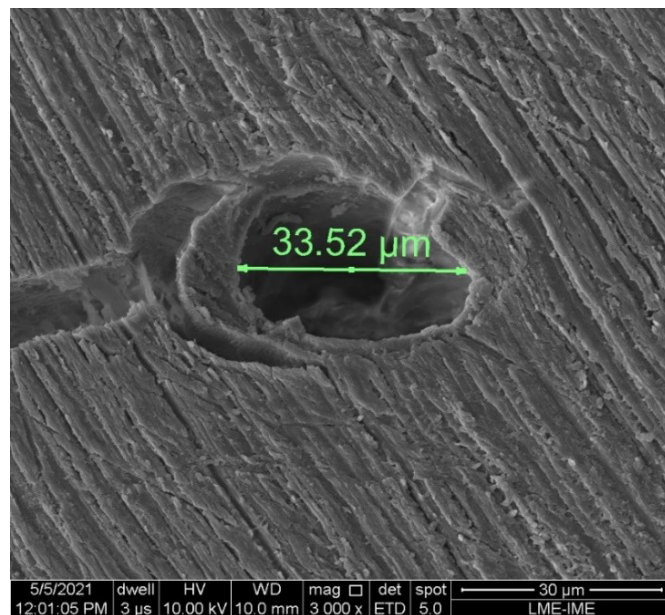


De modo similar ao reportado em estudos anteriores para outros cascos, uma variação no diâmetro dos túbulos foi identificada ao longo da parede dos cascos. A Figura 8 apresenta uma micrografia de um túbulo observado na região distal da parede, com 33,52 µm de diâmetro. Além da variação no diâmetro, em comparação ao túbulo da região intermediária, pode-se notar uma variação no formato, sendo este mais esférico no caso da região distal. Esses valores estão dentro do intervalo de diâmetros encontrado na literatura, que varia de 10 a 60 µm, se considerado o diâmetro da camada externa do túbulo [14,29–31].

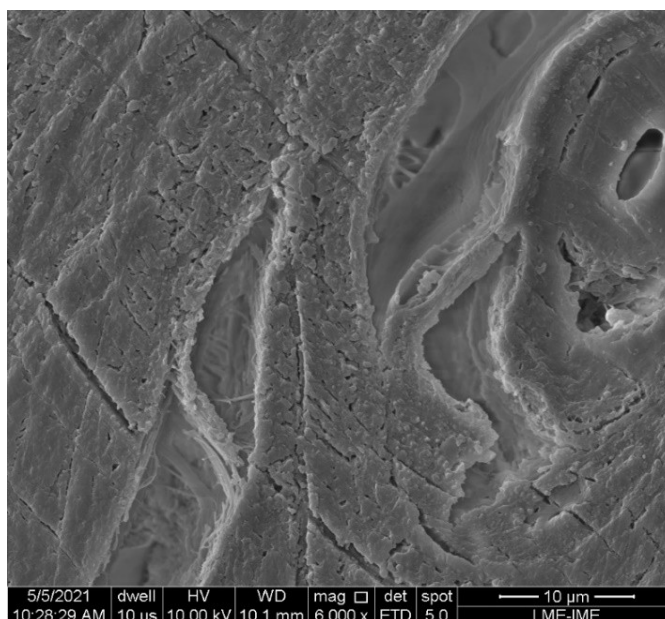
A Figura 9 apresenta uma micrografia da região exatamente adjacente àquela mostrada na Figura 8. Através dessa figura, é possível observar fibrilas das camadas de células de queratina internas, separadas pela propagação de uma trinca. Acredita-se que a presença dessa estrutura em camadas, apresentando uma interface bem definida entre as células, está relacionada a uma maior capacidade de transferência de tensão e absorção de energia [14]. Isso ocorre em decorrência dos mecanismos de delaminação,

alongamento e ruptura das fibrilas de queratina presentes no material intertubular [5].

**Fig. 8** - Micrografia de um único túbulo na seção transversal da parede na região distal, apresentando o diâmetro medido



**Fig. 9** - Micrografia da seção transversal da parede dos cascos na região intermediária, evidenciando uma trinca e os FIs nas camadas internas



## 4. Conclusão

As amostras extraídas da parede abaxial dos cascos bovinos tiveram sua estrutura e composição avaliadas através das técnicas de testes de absorção de água e teor de umidade, difração de raios X (DRX), espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Pôde-se concluir o seguinte:

- Em ambas as regiões estudadas (*i.e.*, distal e proximal), o percentual em peso de água absorvida aproxima-se de um patamar após 3 dias de imersão. Isso pode indicar que um intervalo de imersão de 4 dias é suficiente para garantir a hidratação total da parede dos cascos. Além disso, não foram observadas diferenças significativas na absorção de água das diferentes regiões estudadas, todavia o teor de umidade após imersão foi maior para a região proximal, similar ao reportado para os cascos equinos.
- As análises de difração de raios X permitiram observar a periodicidade associada às moléculas da  $\alpha$ -hélice da queratina dos cascos. A interpretação dos espaçamentos observados mostrou que não houve diferença significativa entre as paredes externa e interna na região distal, e houve diferença entre as regiões distal e proximal, sendo este espaçamento menor na região proximal. Além disso, em ambas as regiões, com o aumento do teor de umidade das amostras, houve uma redução nos espaçamentos observados, o que pode

ser indicativo da interação das moléculas de água com a estrutura da  $\alpha$ -hélice da queratina.

- As análises de espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) permitiram a identificação de diversas bandas de absorção relacionadas às estruturas químicas de amidas A, I, II e III presentes na composição das  $\alpha$ -queratinas. Além disso, a variação do teor de umidade das amostras não revelou nenhum deslocamento nas bandas observadas, tendo sido apenas observada uma mudança na intensidade relativa das bandas.
- A observação da seção transversal da parede dos cascos em diferentes regiões permitiu observar a estrutura interna desse material. Túbulos de diferentes formas, de aspecto esférico a oval, e tamanhos, de 6 a 33  $\mu\text{m}$ , puderam ser identificados na estrutura. Além disso, quatro zonas distintas foram identificadas e comparadas ao que foi reportado em estudos anteriores. Acredita-se que essas zonas, com FIs em diferentes orientações, podem contribuir para maior absorção de energia na parede dos cascos.

## Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao IME pelos recursos utilizados para a realização deste trabalho, bem como pelo financiamento do CNPq, CAPES e FAPERJ.

## Referências

- [1] MCKITTRICK, J.; CHEN, P. Y.; TOMBOLATO, L.; NOVITSKAYA, E. E.; TRIM, M. W.; HIRATA, G. A.; OLEVSKY, E. A.; HORSTEMEYER, M. F.; MEYERS, M. A. Energy Absorbent Natural Materials and Bioinspired Design Strategies: A Review. *Materials Science Engineering C*, v. 30, p. 331-342, 2010.
- [2] MEYERS, M. A.; CHEN, P. Y. *Biological Materials Science*. Nova York: Cambridge University Press, 2014.
- [3] MCKITTRICK, J.; CHEN, P. Y.; BODDE, S. G.; YANG, W.; NOVITSKAYA, E. E.; MEYERS, M. A. The Structure, Functions, and Mechanical Properties of Keratin. *JOM*, v. 64, p. 449-468, 2012.
- [4] WANG, B.; YANG, W.; MCKITTRICK, J.; MEYERS, M. A. Keratin: Structure, Mechanical Properties, Occurrence in Biological Organisms, and Efforts at Bioinspiration. *Progress in Materials Science*, v. 76, p. 229-318, 2016.
- [5] LAZARUS, B. S.; VELASCO-HOGAN, A.; GÓMEZ-DEL RÍO, T.; MEYERS, M. A.; JASIUK, I. A Review of Impact Resistant Biological and Bioinspired Materials and Structures. *Journal of Materials Research and Technology*. v. 9, p. 15705-15738, 2020
- [6] FEUGHELMAN, M. *Mechanical Properties and Structure of Alpha-Keratin Fibres: Wool, Human Hair and Related Fibres*. Sydney: UNSW Press, 1997.



- [7] FRASER, R. D.; MACRAE, T. P. Molecular Structure and Mechanical Properties of Keratins. Symposia of the Society for Experimental Biology, v. 34, p. 211-246, 1980.
- [8] FRASER, R. D. B.; MACRAE, T. P.; ROGERS, G. E. Keratins: Their Composition, Structure and Biosynthesis, Charles C. Thomas. Springfield: [S. n], 1972.
- [9] BERTRAM, J. E.; GOSLINE, J. M. Functional Design of Horse Hoof Keratin: The Modulation of Mechanical Properties through Hydration Effects. The Journal of Experimental Biology, v. 130, p. 121-136, 1987.
- [10] FEUGHELMAN, M.; ROBINSON, M. S. The Relationship Between Some Mechanical Properties of Single Wool Fibers and Relative Humidity. Textile Research Journal, v. 37, p. 441-446, 1967.
- [11] HUANG, W.; YARAGHI, N. A.; YANG, W.; VELAZQUEZ-OLIVERA, A., LI, Z.; RITCHIE, R. O.; KISAILUS, D.; STOVER, S. M., MCKITTRICK, J. A Natural Energy Absorbent Polymer Composite: The Equine Hoof Wall. Acta Biomaterialia, v. 90, p. 267-277, 2019.
- [12] TOMBOLATO, L.; NOVITSKAYA, E. E.; CHEN, P. Y.; SHEPPARD, F. A.; MCKITTRICK, J. Microstructure, Elastic Properties and Deformation Mechanisms of Horn Keratin. Acta Biomaterialia, v. 6, p. 319-330, 2010.
- [13] ZHANG, Q.; BIN, Li, C.; PAN, Y. T.; SHAN, G. H.; CAO, P.; HE, J.; LIN, Z. S.; AO, N. J.; HUANG, Y. X. Microstructure and Mechanical Properties of Horns Derived from Three Domestic Bovines. Materials Science and Engineering C, v. 33, p. 5036-5043, 2013.
- [14] WANG, B.; ZHOU, B.; ZHANG, X.; WANG, B. Microstructure and Mechanical Properties of an Alpha Keratin Bovine Hoof Wall. Journal of Mechanical Behavior of Biomedical Materials, v. 104, 103689, 2020.
- [15] CLARK, C.; PETRIE, L. Fracture Toughness of Bovine Claw Horn from Cattle with and without Vertical Fissures. The Veterinary Journal, v. 173, p. 541-547, 2007.
- [16] BAILLIE, C.; SOUTHAM, C.; BUXTON, A.; PAVAN, P. Structure and Properties of Bovine Hoof Horn. Advanced Composites Letters. Journal, v. 9, 2000.
- [17] ASTM D570-98 Standard Test Method for Water Absorption of Plastics, 2018.
- [18] WU, M.; SHEN, S.; YANG, X.; TANG, R. Preparation and Study on the Structure of Keratin/PVA Membrane Containing Wool Fibers. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, v. 254, 2017.
- [19] VALKOV, A.; ZINIGRAD, M.; SOBOLEV, A.; NISNEVITCH, M. Keratin Biomembranes as a Model for Studying Onychomycosis. International Journal Molecular Science, v. 21, 2020.
- [20] KASAPI, M. A.; GOSLINE, J. M. Exploring the Possible Functions of Equine Hoof Wall Tubules. Equine Veterinary Journal, v. 30, p. 10-14, 2010.
- [21] KITCHENER, A. Effect of Water on the Linear Viscoelasticity of Horn Sheath Keratin. Journal Mater Science Lettering, v. 6, p. 321-322, 1987.
- [22] COLLINS, S. N.; COPE, B. C.; HOPEGOOD, L., LATHAM, R. J.; LINFORD, R. G. Stiffness as a Function of Moisture Content in Natural Materials : Characterisation of Hoof Horn Samples. Journal Mater Science, v. 33, p. 5185-5191, 1998.
- [23] FRASER, R. D. B.; MACRAE, T. P. The Structure of  $\alpha$ -Keratin. Polymer (Guildf), v. 14, p. 61-67, 1973.
- [24] KUI, H.; LIU, X.; LIU, J.; LIANG, W.; ZHANG, S.; QIAN, Z.; REN, L. The Passive Contact Stability of Blue Sheep Hoof Based on Structure, Mechanical Properties, and Surface Morphology. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, v. 8, p. 1-16, 2020.
- [25] HUANG, W. Impact Resistant and Energy Absorbent Natural Keratin Materials: Horns and Hooves: [S. n.], 2018.
- [26] PARKER, F. S. Amides and Amines. In Applications of Infrared Spectroscopy in Biochemistry, Biology, and Medicine. Boston: Springer, 1971. p. 165-172.
- [27] KUMAR, S. L.; ANANDHAVELU, S.; SWATHY, M. Preparation and Characterization of Goat Hoof Keratin/ Gelatin/Sodium Alginate Base Biofilm for Tissue Engineering Application. Integrated Ferroelectrics, v. 202, p. 1-12, 2019.
- [28] VERMUNT, J. J.; GREENOUGH, P. R. Structural Characteristics of the Bovine Claw: Horn Growth and Wear, Horn Hardness and Claw Conformation. British Veterinary Journal, v. 151, p. 157-180, 1995.
- [29] FRANCK, A.; COCQUYT, G.; SIMOENS, P.; DE BELIE, N. Biomechanical Properties of Bovine Claw Horn. Biosystem Engineer, v. 93, p. 459-467, 2006.
- [30] WANG, B.; HUANG, Y.; ZHOU, B.; LI, W.; CHEN, H. Nanoindentation and Hierarchy Structure of the Bovine Hoof Wall. Materials (Basel), v. 14, 2021.
- [31] ASSIS, B. M.; SILVA, L. A. F.; LIMA, C. R. O.; GOUVEIA, R. F.; VULCANI, V. A. S.; DE SANT'ANA, F. J. F.; RABELO, R. E. Microstructure and Hardness of Buffalo's Hoofs. Anatomia Histologia Embryologia, v. 46, p. 439-445, 2017.

# Detecção de Fake News nas Redes Sociais Virtuais: uma revisão dos métodos baseados em dados de propagação

Argus Antonio Barbosa Cavalcante<sup>1</sup>, Paulo Márcio Souza Freire<sup>1</sup>, Ronaldo Ribeiro Goldschmidt<sup>1</sup>, Claudia Marcela Justel<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Militar de Engenharia

Rio de Janeiro, RJ, Brasil

[argus@ime.eb.br](mailto:argus@ime.eb.br)

**RESUMO:** A popularização das redes sociais virtuais aumentou significativamente a divulgação intencional de informações falsas, as chamadas Fake News. Esse tipo de notícia pode causar uma grande variedade de impactos negativos à sociedade, o que reforça a necessidade do desenvolvimento de métodos computacionais que possam detectar esse tipo nocivo de notícia. Entre os métodos computacionais existentes, destacam-se aqueles que utilizam os dados de propagação da notícia, tendo em vista sua relação com a natureza disseminativa das informações existentes nas redes sociais. Assim, este trabalho apresenta uma revisão do estado da arte dos métodos de detecção de Fake News baseados em dados de propagação da notícia. Ao introduzir os conceitos básicos relacionados a esses métodos, além de apresentar e discutir suas principais características, espera-se fornecer subsídios para a criação de novos trabalhos na área.

**PALAVRAS-CHAVE:** Redes Sociais Virtuais. Informações falsas. Fake News. Dados de propagação. Métodos computacionais.

**ABSTRACT:** The popularization of virtual social media has significantly increased the intentional dissemination of false information, known as Fake News. This type of news can cause a wide range of negative impacts on society, reinforcing the need for developing computational methods that can detect this harmful type of news. Among the existing computational methods, those that use news propagation data have been highlighted given their relation with the disseminative nature of information on social media. Thus, this study describes a state-of-the-art review of Fake News detection methods based on news propagation data. By introducing the basic concepts related to these methods and describing and discussing their main characteristics, the authors intend to provide subsidies for the creation of new research in this area.

**KEYWORDS:** Virtual Social Networks. Disinformation. Fake News. Propagation data. Computational tools.

## 1. Introdução

Embora a divulgação de notícias esteja historicamente ligada aos meios tradicionais de comunicação, como jornais, revistas e televisão, recentemente as redes sociais virtuais (RSVs) se consolidaram como um importante meio de divulgação de notícias para os usuários [1]. Entre os motivos para essa mudança, pode-se destacar a relevância e a popularidade das RSVs na atualidade, bem como a existência de um processo simplificado de publicação de conteúdo nessas redes [2]. Esse processo, combinado a grande variedade de mecanismos de interação com o conteúdo publicado, acaba por impulsionar a audiência das publicações e consequentemente das próprias RSVs.

Nesse contexto, além das notícias reais, baseadas na apuração jornalística dos fatos, tipicamente feita pela imprensa, é possível também, encontrar diversos

exemplos de informações falsas divulgadas de forma intencional, chamadas de Fake News [2]. Diversos episódios ocorridos nos últimos anos atraíram atenção para esse tipo de informação nas RSVs, entre os quais podemos destacar:

- Durante e logo após a ocorrência do furacão Katrina em 2005, diversas notícias falsas foram divulgadas com temas que foram desde a origem e explicação do fenômeno atmosférico, até quais eram as áreas afetadas e os impactos gerados na vida das pessoas<sup>1</sup>;
- Por ocasião dos atentados terroristas à Maratona de Boston, ocorrida nos Estados Unidos em 2013,

<sup>1</sup> Cf.: <https://www.theguardian.com/us-news/2015/aug/16/hurricane-katrina-new-orleans-looting-violence-misleading-reports>

informações falsas foram disseminadas, gerando medo e apreensão sobre o fato<sup>2</sup>;

- Nas eleições presidenciais americanas de 2016, disputadas pelo candidato republicano Donald Trump e a candidata democrata Hillary Clinton, *Fake News* foram difundidas com o objetivo de distorcer fatos e opiniões relacionados a temas da campanha em favor de um ou outro candidato<sup>3</sup>; - Mais recentemente, durante a pandemia do covid-19, houve divulgação de informações falsas com temas que abrangeram a origem da doença, o potencial de uso e aplicação de remédios, além da eficácia das vacinas<sup>4</sup>.

Episódios como esses podem gerar diferentes impactos na sociedade, como, por exemplo, o descrédito da imagem pública de pessoas e instituições, problemas envolvendo a segurança pública e até mesmo um eventual sentimento coletivo de insegurança [3]. Sua ocorrência frequente atrai a atenção da sociedade, despertando, dessa forma, o interesse da academia e da indústria em entender e analisar a ocorrência desse fenômeno.

Devido ao grande volume e velocidade de publicações nas RSVs, e ainda, diante da dificuldade de avaliar manualmente a veracidade das notícias, torna-se cada vez mais comum o uso de métodos computacionais para o combate a esse tipo de conteúdo [2]. Entre os principais métodos para a detecção de *Fake News*, aqueles relacionados ao uso dos dados de propagação da notícia, recentemente se destacam por sua relação intrínseca com a natureza disseminativa das informações existentes nas RSVs. Esses métodos utilizam os dados relacionados às interações dos usuários que ocorrem a partir da publicação da notícia, como no caso do compartilhamento de uma publicação, um comentário ou outros tipos de reação ao conteúdo publicado [1].

---

2 Cf.: <https://www.bbc.com/news/world-us-canada-39930236>

3 Cf.: <https://www.washingtonpost.com/news/the-fix/wp/2018/01/03/how-hillary-clinton-might-have-inspired-trumps-fake-news-attacks/>

4 Cf.: <https://edition.cnn.com/2021/11/09/media/kaiser-covid-misinformation/index.html>

Apesar dos resultados promissores obtidos pelos métodos de detecção de *Fake News* que utilizam os dados de propagação da notícia, até onde foi possível observar, ainda são poucos os trabalhos de revisão do estado da arte que exploraram [4] suas principais características. Dessa forma, este trabalho de pesquisa pretende abordar alguns aspectos importantes não abordados por trabalhos anteriores.

Além da presente introdução, o artigo contém três seções adicionais. A *Seção 2* apresenta breve fundamentação teórica de assuntos inerentes ao tema da revisão. Na *Seção 3*, são apresentados os trabalhos relacionados e o modelo utilizado para a sua comparação. Finalmente, na *Seção 4* são apresentadas as conclusões dessa revisão, além de algumas considerações adicionais.

## 2. Conceitos Básicos

### 2.1 Redes Sociais Virtuais

Nos últimos anos, as RSVs se popularizaram de forma massiva, fazendo com que milhões de usuários as utilizem todos os dias [5]. As RSVs são compostas por pessoas, entidades, empresas e organizações que se conectam e interagem entre si, em um ambiente colaborativo que oferece diversas facilidades de comunicação para seus usuários. Dada a grande variedade de RSVs existentes, houve uma segmentação dessas redes em função do conteúdo publicado e do público que pretendem atingir. Por exemplo, enquanto o conteúdo do TikTok<sup>5</sup> consiste principalmente de vídeos e é voltado para o público jovem, o LinkedIn<sup>6</sup> tem o foco no mundo corporativo, sendo amplamente utilizado por empresas e profissionais das mais variadas indústrias.

As relações nas RSVs se estabelecem com base em princípios de influência social, similares aqueles existentes nas redes sociais não virtuais [6]. Quando pessoas estão conectadas em uma RSV, torna-se possível influenciar o comportamento e as decisões de outras pessoas. Essa influência pode ser observada

---

5 Cf.: <https://www.tiktok.com/>

6 Cf.: [www.linkedin.com](http://www.linkedin.com)

em diversas situações, como, por exemplo, nas opiniões emitidas a respeito de produtos comprados, na demonstração de posições políticas, nas informações sobre atividades realizadas por um determinado usuário, ou mesmo em um lugar por ele visitado. No contexto das RSVs, as pessoas normalmente tomam decisões com base em suas inferências a partir do que outras pessoas fizeram. Esse comportamento é conhecido como *herding behavior* [6] e ocorre na forma de um processo sequencial de tomada de decisão dos usuários de uma rede. A popularidade das RSVs, somada à influência social entre seus usuários, reforçam a necessidade do estudo das *Fake News* nessas redes.

## 2.2 Informações Falsas

O estado da arte caracteriza os diferentes tipos de informações falsas como *Misinformation* e *Disinformation* [2]. No primeiro tipo, enquadram-se as informações que são acidentalmente falsas, em consequência de erros. Já no segundo tipo, estão as informações conhecidamente falsas, divulgadas de forma intencional. Ou seja, a intencionalidade se estabelece como critério fundamental utilizado para distinguir os dois tipos de informações falsas. Nesse contexto, para que uma notícia seja considerada uma *Fake News* sua divulgação de forma intencional deverá ser confirmada.

Vale ressaltar que as *Fake News* encontradas nas RSVs fazem parte de um sistema composto por diversos participantes e que extrapola essas redes. Entre os participantes mais relevantes estão a imprensa, as agências de checagem de fatos, as pessoas publicamente expostas, os poderes legislativo e judiciário, além dos próprios usuários das RSVs [2]. Embora nem todos os tipos de informações falsas sejam necessariamente notícias, conforme citado anteriormente, a imprensa possui um papel importante no sistema de divulgação de informações falsas. Em algumas situações, o processo tradicional do trabalho jornalístico é descaracterizado pelas informações falsas, com a substituição da apuração cuidadosa dos fatos e a impossibilidade das partes envolvidas expressarem suas opiniões (muitas vezes de natureza contraditória). Com o objetivo de complementar o

trabalho da imprensa no contexto das *Fake News*, surgiram as agências de checagem de fatos. Essas agências também monitoram as informações divulgadas nos meios tradicionais de comunicação, mas se concentram naquelas que circulam nas RSVs [1]. As informações analisadas, tipicamente, encontram-se em formato de artigos, notícias ou mesmo discursos e afirmações oriundos, majoritariamente, de pessoas públicas, dando preferência a assuntos de interesse geral que tenham ganhado destaque recente. Como resultado do seu trabalho, é obtida uma avaliação da informação analisada, com base no processo de checagem dos fatos que é realizado por suas equipes.

As pessoas publicamente expostas, tais como celebridades, políticos, influenciadores sociais e outras personalidades de destaque são, comumente, tanto alvos quanto disseminadores de informações falsas, tendo em vista que as informações relacionadas a essas pessoas obtêm, normalmente, maior alcance, são mais compartilhadas e discutidas [7]. Os poderes legislativo e judiciário possuem papel central nesse sistema. Com o aumento da divulgação de informações falsas nas RSVs, surgiu a necessidade de estudar e propor leis que possam punir os responsáveis pela sua divulgação, especialmente quando causam algum tipo de dano às partes envolvidas. Tanto no poder judiciário brasileiro, quanto em outros países, existem atualmente discussões a esse respeito. Na falta de leis específicas, o poder judiciário hoje, utiliza de leis gerais, como, por exemplo, as leis de danos materiais e morais decorrentes da eventual agressão à honra das vítimas de informações falsas [8].

## 2.3 Combate Automático às Fake News

Além do tratamento manual que pode ser realizado por uma agência de checagem de fatos, uma outra possibilidade tem sido muito explorada recentemente, trata-se do uso de recursos computacionais com o objetivo de detectar automaticamente as *Fake News*, evitando, dessa forma, a necessidade de detecção manual ou complementando-a quando necessário [1]. Essa alternativa tem se mostrado amplamente viável, em especial por conta do avanço no uso de métodos computacio-



nais por meio da aplicação de técnicas de mineração de dados e aprendizado de máquina [9], além do aumento da capacidade de processamento dos computadores que suportam sua execução.

No contexto do combate automático às *Fake News*, duas principais funcionalidades se consolidam: a detecção e a intervenção das *Fake News* [4]. Na detecção temos, em resumo, um problema de classificação binária. Considerando a avaliação de uma dada notícia, o resultado será verdadeiro caso seja uma *Fake News*, ou falso caso contrário. Visando evitar os efeitos nocivos da divulgação das *Fake News*, temos a funcionalidade de intervenção, na qual torna-se possível interromper a propagação de uma notícia determinada.

## 3 Estado da Arte

### 3.1 Seleção dos trabalhos

Para analisar o estado da arte dos métodos para detecção de *Fake News* que utilizam os dados de propagação da notícia, foi definido um conjunto de critérios para seleção dos trabalhos relacionados. Inicialmente, foram definidas as bases de artigos a serem consultadas. Devido a sua popularidade em temas relacionados à computação, foram selecionadas: Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE)<sup>7</sup>, Association for Computing Machinery (ACM)<sup>8</sup> e Science Direct<sup>9</sup>. Definidas as bases de artigos, procedeu-se a identificação de uma questão inicial de busca composta pelas palavras-chave relacionadas ao tema de propagação de informações falsas divulgadas de forma intencional, resultando em “*Fake News*+ *propagation*”. Além da questão de busca, foi utilizado o critério de identificar o sistema de “qualis” classificação dos artigos, privilegiando, sempre que possível, aqueles no estrato superior. Foram considerados trabalhos escritos após 2015 devido a carência de trabalhos publicados antes dessa data de corte.

7 Cf.: <https://ieeexplore.ieee.org/>

8 Cf.: <http://dl.acm.org>

9 Cf.: <https://www.sciencedirect.com>

### 3.2 Trabalhos Relacionados

Nesta seção serão apresentados os trabalhos selecionados para revisão nos quais foram desenvolvidos métodos computacionais para a detecção de *Fake News* com base em dados de propagação da notícia. Cada trabalho é descrito de forma resumida, incluindo os dados utilizados, o tipo de aprendizado, *datasets* e melhores resultados obtidos nos experimentos realizados por esses trabalhos. Detalhes adicionais desses trabalhos podem ser consultados por meio das suas referências:

- *News credibility evaluation on microblog with a hierarchical propagation model* [10]: os autores se baseiam na tríade notícia, usuário e comunidade para detecção de *Fake News*, propondo, como parte de seu trabalho, a criação de um modelo hierárquico que identifica sub-eventos dentro das notícias, de maneira a descrever seus detalhes. O problema da detecção automática é tratado como um problema de otimização de grafo, no qual uma ótima solução é proposta. Foram utilizados os dados de conteúdo do texto, tópicos de *hashtags*, links, entre outros. Esse trabalho se baseia na aprendizagem supervisionada. Os *datasets* utilizados são SW-2013 e SW-MH370. O melhor resultado obtido foi 0.889 (Acurácia).
- *CSI: A hybrid deep model for Fake News detection* [11]: o processo de detecção se divide em três partes: *Capture*, *Score* e *Integrate* (CSI). O primeiro módulo é baseado na resposta e no texto, por meio de uma rede neural recorrente, *long short-term memory* (LSTM), para capturar um padrão temporal de atividades do usuário sobre o artigo e a representação *doc2vec* do texto gerado nessa atividade. O segundo, usa uma rede neural para aprender as características da fonte baseado no comportamento dos usuários de acordo com suas interações, gerando um score por meio de um grafo. Os dois módulos são integrados com o terceiro para caracterizar, ou não, o artigo como *Fake News*. Foram utilizados dados dos usuários, sem especificar exatamente quais. Esse trabalho se baseia na aprendizagem supervisionada. Os *datasets* utilizados são Twitter e Weibo. O melhor resultado obtido foi 0.892 (Acurácia).

- *Tracing fake-news footprints: Characterizing social media messages by how they propagate* [12]: esse método utiliza a proximidade dos nós e as dimensões sociais para inferir uma representação dos usuários da rede social para, posteriormente, representar e classificar os caminhos de propagação de mensagens propagadas pelos referidos usuários. Foram utilizados os dados da estrutura de propagação da notícia. Esse trabalho se baseia na aprendizagem supervisionada. O *dataset* utilizado é uma adaptação do Twitter. O melhor resultado obtido foi 0.9380 (F-Measure).
- *Fake news detection on social media using geometric deep learning* [13]: explora padrões de propagação das Fake News com o uso de *Geometric Deep Learning* (generalização das técnicas de *deep learning* para dados não euclidianos como grafos que utilizam redes neurais convolucionais), utilizando quatro tipos de informações: perfil do usuário, atividade do usuário, rede e conteúdo. Foram utilizados os dados de configurações de perfil, linguagem, descrição do perfil, geolocalização, usuário verificado, conexões sociais entre usuários, e outros. Esse trabalho se baseia na aprendizagem supervisionada. Os *datasets* utilizados são adaptações de Twitter15 e Twitter16. O melhor resultado obtido foi 92.7% (ROC AUC).
- *Hierarchical propagation networks for Fake News detection: Investigation and exploitation* [14]: desenvolveu o conceito de propagação hierárquica da rede para detecção de Fake News. Para construir essa estrutura hierárquica, se baseia em dois níveis: 1. Macro-level (análise topológica e temporal da rede) e 2. Micro-level (análise topológica, temporal e linguística da rede). Foram utilizados os dados da estrutura de propagação da notícia. Esse trabalho se baseia na aprendizagem supervisionada. Os *datasets* utilizados são Politifact e GossipCop. O melhor resultado obtido foi 0.863 (Acurácia).
- *Network-based Fake News detection: A pattern-driven approach* [15]: propõe-se a investigar os padrões de disseminação de Fake News. De maneira geral, esses padrões podem ser classificados em três grupos: 1. Padrões relacionados a notícia, 2. Padrões relacionados aos divulgadores das notícias e 3. Padrões de relacionamento entre os divulgadores da notícia. Foram utilizados os dados da estrutura de propagação da notícia. Esse trabalho se baseia na aprendizagem supervisionada. Os *datasets* utilizados são Politifact e BuzzFeed. O melhor resultado obtido foi 0.929 (Acurácia).
- *GCAN: Graph-aware co-attention networks for explainable Fake News detection on social media* [16]: utiliza o conteúdo do *tweet* original e a sequência de *re-tweets* correspondentes para detectar a notícia como “fake” ou “not fake”. Em primeiro lugar, extrai informações dos usuários de seus perfis e interações, aprendendo o *embedding* do conteúdo original. Depois, usa redes neurais convolucionais (CNN) e recorrentes (RNN) para aprender a representação da propagação dos *re-tweets*, construindo um grafo que modela as possíveis interações entre os usuários. Finalmente, estabelece a correlação entre o *tweet* original e sua propagação, gerando uma predição binária baseada nessa correlação. Foram utilizados os dados de geolocalização, usuário verificado, entre outros. Esse trabalho se baseia na aprendizagem supervisionada. Os *datasets* utilizados são Twitter15 e Twitter 16. O melhor resultado obtido foi 0.9084 (Acurácia).
- *Graph neural networks with continual learning for Fake News detection from social media* [17]: os autores consideram que as informações falsas e as verdadeiras se propagam de forma diferente na internet. Além das informações do fluxo, utilizam oito atributos das publicações (usuário verificado do Twitter, *timestamp* da criação do usuário, número de seguidores, número de amigos, número de listas, número de favoritos, número de status e *timestamp* dos tweets). Faz uso de redes neurais em grafos (GNN) para diferenciar padrões de notícias *fake* e não *fake*. Foram utilizados os dados de usuário verificado, data de criação de perfil, entre outros. Esse trabalho se baseia na aprendizagem supervisionada. Os *datasets* utilizados são FakeNewsNet (Politifact e GossipCop). O melhor resultado obtido foi 0.853 (Acurácia).
- *Unsupervised Fake News Detection: A Graph-based Approach* [18]: Método composto por três etapas: 1. Mineração de bi-cliques, com base em notícias compartilhadas de forma síncrona geran-

do um conjunto *Seed* (grafo heterogêneo – vértices do tipo usuário e artigo); 2. Mineração de bi-cliques dos artigos restantes (sem a restrição de compartilhamento síncrono), com o uso de similaridade do texto da publicação e informações dos usuários; e 3. Mineração dos artigos restantes (fora dos bi-cliques), com o uso de similaridade do texto da publicação e informações dos usuários. Foram utilizados os dados da estrutura de propagação da notícia. Baseia-se na aprendizagem não supervisionada. Os *datasets* utilizados são FakeNewsNet (Politifact e GossipCop). O melhor resultado obtido foi 0.800 (Acurácia).

- *Fake news detection in social networks via crowd signals* [19]: Motivados por uma ferramenta na época, recém introduzida na rede social Facebook, nesse trabalho foram utilizados os chamados *crowd signals* para realizar a detecção das *Fake News*. Esses sinais são a opinião explícita dos usuários indicando que determinado conteúdo é uma *Fake News*. Seus autores desenvolveram um algoritmo que realiza a inferência Bayesiana capaz de aprender ao longo do tempo sobre a capacidade dos usuários em opinar sobre esse tipo de conteúdo. Foram utilizados os dados de opinião dos usuários. Baseia-se na aprendizagem semi-supervisionada. O *dataset* utilizado é Facebook. O melhor resultado obtido foi 0.9967 (Acurácia).
- *Fake news detection based on explicit and implicit signals of a hybrid crowd: An approach inspired in meta-learning* [20]: inspirado em [19], esse trabalho também utiliza os chamados *crowd signals* para realizar a detecção de *Fake News*. Porém, de forma oposta ao trabalho inicial, que utiliza a chamada opinião explícita dos usuários, emitida por meio de uma ferramenta voltada para esse fim –, seus autores exploraram o uso da opinião implícita dos usuários, obtida através de seu comportamento ao interagir com esse tipo de conteúdo. Esse trabalho combina, ainda, a opinião implícita dos usuários com a de máquinas (algoritmos), formando o chamado *crowd híbrido*. Foram utilizados os dados da opinião implícita dos usuários, além da quantidade de interações e o texto da

notícia. Esse trabalho se baseia na aprendizagem supervisionada. Os *datasets* utilizados são Gossip, Politifact, Gossip2, FakeNewsSet e FakeBR. O melhor resultado obtido foi 0.9989 (Acurácia).

- *Early detection of Fake News on social media through propagation path classification with recurrent and convolutional networks* [21]: esse trabalho utiliza a classificação do fluxo de propagação criado pela notícia para realizar a detecção de forma antecipada. Essa classificação é realizada a partir da modelagem do fluxo de divulgação das notícias como uma série temporal multivariada, na qual cada dupla de valores é um vetor numérico representando as características do usuário que participou do processo de propagação. Foram utilizados dados do usuário como suas amizades e seguidores, além da idade e características de geolocalização desses usuários, entre outros. Esse trabalho se baseia na aprendizagem supervisionada. Os *datasets* utilizados são Twitter 15, Twitter16 e Weibo. O melhor resultado obtido foi 0.921 (Acurácia).
- *Propagation2vec: Embedding partial propagation networks for explainable Fake News early detection* [22]: os autores atribuem diferentes níveis de importância para os elementos de propagação das notícias, reconstruindo o conhecimento sobre o fluxo completo dessas notícias com base em fluxos parciais da propagação. O método utiliza mecanismos de atenção hierárquicos para enfatizar as informações mais importantes existentes nesses fluxos. Foram utilizados os dados do usuário como: se ele é verificado, seus seguidores, amizades, listas, favoritos, *tweets*, entre outros. Esse trabalho se baseia na aprendizagem supervisionada. Os *datasets* utilizados são Politifact, Gossipcop. O melhor resultado obtido foi 0.897 (Acurácia).
- *Detect rumors in microblog posts using propagation structure via kernel learning* [23]: cria inicialmente uma representação da propagação através de árvores para, na sequência, capturar padrões que diferenciam os tipos de rumores por meio da avaliação da similaridade de sua estrutura (kernel-based method). Embora descreva a detecção de rumores, a saída desse método tam-

bém aponta uma notícia como “fake” ou “not fake” (*non-rumor, false rumor, true rumor or unverified rumor*). Foram utilizados os dados do usuário como seus seguidores e amigos, status de verificação da conta, histórico de posts, entre outros. Esse trabalho se baseia na aprendizagem supervisionada. Os *datasets* utilizados são adaptações de Twitter15 e Twitter16. O melhor resultado obtido foi 0.750 (Acurácia).

### 3.2 Modelo comparativo

De forma a proceder com a análise do estado da arte, foram definidos três critérios de comparação entre os trabalhos selecionados. São eles: os dados de propagação utilizados, a indicação sobre o uso de dados de acesso restrito e a realização, ou não, da detecção de *Fake News* de forma antecipada. A escolha desses critérios visa aprofundar o entendimento sobre as principais características e limitações existentes nos trabalhos selecionados.

Existe grande variedade de dados de propagação utilizados pelo estado da arte. No trabalho de [4], foi estabelecida uma classificação desses dados considerando as seguintes categorias: contribuição, usuário, assunto, temporalidade e rede. A contribuição de um usuário diz respeito aos diferentes tipos de mídias (por exemplo, texto, áudio ou imagens) utilizados durante a propagação. Em relação ao usuário propagador da notícia, são obtidos os dados de seu perfil e sua reputação, que pode estar vinculada à sua capacidade de identificar, ou publicar *Fake News*. Outro aspecto relevante é o assunto da notícia, que visa explorar a relação da notícia em questão com assuntos populares e controversos. Em relação ao critério de temporalidade, utilizam-se dados sobre o tempo de cada uma das propagações da notícia, critério importante do ponto de vista da detecção automática de *Fake News*. Por último, temos também o critério da rede, no qual pretende-se identificar se foram utilizados dados dos relacionamentos de cada usuário que interagiu com uma dada notícia.

Com base na classificação exposta, a Tabela 1 resume a relação dos trabalhos selecionados com os tipos de dados de propagação utilizados. É possível

observar que os tipos mais frequentemente utilizados são dados do usuário e sua rede de relacionamentos, além da temporalidade relacionada às interações que ocorreram durante a propagação da notícia. Os dados da contribuição também foram utilizados, ainda que em menor número.

**Tabela 1** - Utilização de dados de propagação: C (Contribuição), U (Usuário), A (Rede), T (Temporalidade) e R (Rede).

| Trabalho | C | U | A | T | R |
|----------|---|---|---|---|---|
| [10]     |   | X | X |   |   |
| [11]     |   | X |   | X | X |
| [12]     |   | X |   | X | X |
| [13]     |   | X |   | X | X |
| [14]     | X | X |   | X | X |
| [15]     | X | X |   |   | X |
| [16]     | X | X |   | X | X |
| [17]     | X | X |   | X | X |
| [18]     | X | X |   | X | X |
| [19]     |   | X |   |   |   |
| [20]     | X | X |   | X | X |
| [21]     | X | X |   | X | X |
| [22]     |   | X |   | X | X |
| [23]     |   | X |   | X | X |

Embora diversos dados de propagação sejam utilizados pelo estado da arte, sua aplicação prática pode ser inviabilizada diante de restrições de acesso a esses dados. Essas restrições se devem principalmente à consolidação do arcabouço jurídico da privacidade de dados [24], especialmente devido às leis como a *General Data Protection Regulation* (GDPR) e a Lei Geral de Proteção de Dados Pessoais (LGPD). Considerando o grande número de incidentes de segurança e a popularização do uso da internet em todo o mundo, houve grande debate sobre a necessidade de leis para auxiliar o combate aos crimes virtuais, que culminou na criação das referidas leis. Em resposta a esse movi-



mento, as RSVs criaram suas políticas de privacidade de dados, garantindo o tratamento adequado e restrição no acesso aos dados. Essas políticas se concentram principalmente em dados pessoais (por exemplo, nome, apelido, fotografia e localização geográfica) e dados sensíveis (religião, origem racial, entre outros exemplos). Os dados pessoais podem ser utilizados para identificar um usuário, já os dados sensíveis têm o potencial de causar discriminação às pessoas. Assim, trabalhos que dependem de dados de acesso restrito para realizar a detecção de *Fake News* possuem desvantagem significativa em relação a trabalhos que não dependam desses dados.

A Tabela 2 apresenta um resumo dos trabalhos relacionados em função da utilização dos dados de acesso restrito, sendo possível observar que há uma distribuição equivalente entre os trabalhos que dependem e aqueles que não dependem desses dados.

**Tabela 2** - Utilização de dados de acesso restrito.

| Trabalho | Utiliza Dados de Acesso Restrito ? |
|----------|------------------------------------|
| [10]     | Sim                                |
| [11]     | Não foi possível determinar.       |
| [12]     | Não                                |
| [13]     | Sim                                |
| [14]     | Não                                |
| [15]     | Não                                |
| [16]     | Sim                                |
| [17]     | Sim                                |
| [18]     | Não                                |
| [19]     | Não                                |
| [20]     | Não                                |
| [21]     | Sim                                |
| [22]     | Sim                                |
| [23]     | Sim                                |

Um desafio imposto aos métodos de detecção automática de *Fake News*, tanto para aqueles que utilizam os dados de propagação ou, eventualmente, ou-

tros tipos de dados, é o fato de que a propagação da notícia pode demorar horas, dias, semanas e até mesmo anos para ser concluída. A partir do momento em que a notícia é publicada, ela pode ficar disponível de forma permanente. Ou seja, usuários que porventura tiverem acesso a esse conteúdo, continuam a poder interagir com ele e assim, podem criar novos ciclos de propagação da notícia. Considerando que a espera de um tempo maior dificulta a implementação de ações de intervenção que objetivam evitar os impactos das *Fake News*, alguns métodos de detecção baseados em dados de propagação buscam realizar a detecção de forma antecipada [1]. Nesses trabalhos, a detecção deve ser realizada nos estágios iniciais da propagação, isto é, antes que essa notícia tenha sido amplamente divulgada. Esse critério também foi considerado como parte da análise do estado da arte.

Observando a Tabela 3, torna-se possível verificar que o uso da detecção antecipada por parte dos métodos de detecção de *Fake News* ainda é incomum.

**Tabela 3** - Realização da Detecção Antecipada.

| Trabalho | Realiza a Detecção Antecipada ? |
|----------|---------------------------------|
| [10]     | Não                             |
| [11]     | Não                             |
| [12]     | Não                             |
| [13]     | Não                             |
| [14]     | Não                             |
| [15]     | Não                             |
| [16]     | Não                             |
| [17]     | Não                             |
| [18]     | Não                             |
| [19]     | Não                             |
| [20]     | Não                             |
| [21]     | Sim                             |
| [22]     | Sim                             |
| [23]     | Sim                             |

## 4 Conclusão

Nos últimos anos, o uso das redes sociais virtuais para divulgação de notícias se torna cada vez mais frequente. No entanto, essas redes são também utilizadas para a divulgação das Fake News, que são notícias intencionalmente falsas. Neste artigo foi feita a revisão do estado da arte com foco nos trabalhos que utilizam um tipo particular de dados relacionados com a propagação das notícias. Embora populares, poucas revisões [4] foram feitas visando avaliar especificamente esse tipo particular de dados. Nesse contexto, este artigo fez uma atualização em relação ao trabalho

de revisão anterior [4], destacando os trabalhos de detecção de Fake News que utilizam dados de propagação. O resultado desta revisão aponta algumas observações relevantes que merecem ser destacadas. Em primeiro lugar, é amplo o espectro de tipos de dados de propagação utilizados pelo estado da arte. Já em relação ao uso de dados de acesso restrito, os trabalhos se dividem de forma equilibrada entre aqueles que dependem ou não dessa restrição. Finalmente, a detecção antecipada de Fake News, que busca habilitar ações de intervenção após a detecção da notícia, ainda é pouco explorada.

## Referências

- [1] ZHOU, X.; ZAFARANI, R. A survey of Fake News: Fundamental theories, detection methods, and opportunities. *ACM Computing Surveys*, New York, v. 53, n. 5, p. 1-40, 2020.
- [2] SHARMA, K.; QIAN, F.; JIANG, H.; RUCHANSKY, N.; ZHANG, M.; LIU, Y. Combating Fake News: A survey on identification and mitigation techniques. *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology*, New York, v. 10(3), n. 21, p. 1-42, Apr. 2019.
- [3] WATTS, D. J.; ROTHCHILD, D. M.; MOBIUS, M. Measuring the news and its impact on democracy. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Madison, v. 118, n. 5, e1912443118, 2021. DOI 10.1073/pnas.1912443118
- [4] FREIRE, P. M.; GOLDSCHMIDT, R. R. Combate automático às Fake News nas mídias sociais virtuais. *Revista Militar de Ciência e Tecnologia*, Rio de Janeiro, v. 38 n. 2, p. 3-12, 2021.
- [5] EASLEY, D.; KLEINBERG, J. *Networks, Crowds, and Markets: Reasoning About a Highly Connected World*. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.
- [6] EASLEY, D.; KLEINBERG, J. *Networks, Crowds, and Markets: Reasoning about a Highly Connected World*. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.
- [7] KUMAR, S.; CHENG, J.; LESKOVEC, J. Antisocial behavior on the web: Characterization and detection. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WORLD WIDE WEB COMPANION, 26., 2017, Perth. *Anais [...]*. Republic and Canton of Geneva: International World Wide Web Conference Committee, 2017. p. 947-950.
- [8] FLUMIGNAN, W. G. G. As Fake News à luz da legislação brasileira. *Revista Científica Disruptiva*, Recife, v. 2 n. 2, p. 145-161, 2020.
- [9] GOLDSCHMIDT, R.; PASSOS, E.; BEZERRA, E. *Data Mining*. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier Brasil, 2015.
- [10] JIN, Z.; CAO, J.; JIANG, Y. G.; ZHANG, Y. News credibility evaluation on microblog with a hierarchical propagation model. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON DATA MINING, 14., 2014, Shenzhen. *Anais [...]*. Piscataway: Institute of Electrical and Electronics Engineer, 2014. p. 230-239.
- [11] RUCHANSKY, N.; SEO, S.; LIU, Y. CSI: A hybrid deep model for Fake News detection. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFORMATION AND KNOWLEDGE MANAGEMENT, 26., 2017, Singapore. *Anais [...]*. New York: Association for Computing Machinery, 2017. p. 797-806.
- [12] WU, L.; LIU, H. Tracing fake-news footprints: Characterizing social media messages by how they propagate. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WEB SEARCH AND DATA MINING, 11., 2018, Marina Del Rey. *Anais [...]*. New York: Association for Computing Machinery, 2018. p. 637-645.
- [13] MONTI, F.; FRASCA, F.; EYNARD, D.; MANNION, D.; BRONSTEIN, M. M. Fake News detection on social media using geometric deep learning. Appleton: *ICLR*, 2019.
- [14] SHU, K.; MAHUESWARAN, D.; WANG, S.; LIU, H. Hierarchical propagation networks for Fake News detection: Investigation and exploitation. *Proceedings of the International AAAI Conference on Web and Social Media*, [s. l.], v. 14, n. 1, p. 626-637, 2019.

- [15] ZHOU, X.; ZAFARANI, R. Network-based Fake News detection: A pattern-driven approach. *SIGKDD Explorations*, [s. l.], v. 21, n. 2, p. 48-60, 2019.
- [16] LU, Y.-J.; LI, C.-T. GCAN: Graph-aware co-attention networks for explainable Fake News detection on social media. In: ANNUAL MEETING OF THE ASSOCIATION FOR COMPUTATIONAL LINGUISTICS, 58., 2020, Online. *Anais [...]*. Kerrville: Association for Computational Linguistics, 2020. p. 505–514.
- [17] HAN, Y.; KARUNASEKERA, S.; LECKIE, C. *Graph neural networks with continual learning for Fake News detection from social media*. Nova York: Cornell GANGIREDDY, S. C. R. P. D.; LONG, C.; CHAKRABORTY, T. Unsupervised Fake News detection: A graph-based approach. In: HYPERTEXT AND SOCIAL MEDIA, 31., 2020, Online. *Anais [...]*. New York: Association for Computing Machinery, 2020. p. 75–83.
- [18] TSCHIATSCHEK, S.; SINGLA, A.; GOMEZ RODRIGUEZ, M.; MERCHANT, A.; KRAUSE, A. Fake news detection in social networks via crowd signals. In: COMPANION PROCEEDINGS OF THE THE WEB CONFERENCE 2018, *Anais [...]*. Republic and Canton of Geneva: International World Wide Web Conferences Steering Committee, 2018. p. 571-524.
- [19] SOUZA FREIRE, P. M.; MATIAS DA SILVA, F. R.; GOLDSCHMIDT, R. R. Fake news detection based on explicit and implicit signals of a hybrid crowd: An approach inspired in meta-learning. *Expert Systems with Applications*, [s. l.], v. 183, 115414, 2021.
- [20] LIU, Y.; WU, Y.-F. Early detection of Fake News on social media through propagation path classification with recurrent and convolutional networks. Thirty-Second AAAI Conference on Artificial Intelligence, 32., 2018, New Orleans. *Anais [...]*. Palo Alto: AAAI Press, 2018. p. 354-361.
- [21] SILVA, A.; HAN, Y.; LUO, L.; KARUNASEKERA, S.; LECKIE, C. Propagation2vec: Embedding partial propagation networks for explainable Fake News early detection. *Information Processing Management*, [s. l.], v. 58, n. 5 102618, 2021.
- [22] MA, J.; GAO, W.; WONG, K. Detect rumors in microblog posts using propagation structure via kernel learning. In THE 55TH ANNUAL MEETING OF THE ASSOCIATION FOR COMPUTATIONAL LINGUISTICS, 55., 2017, Vancouver. 1. *Anais [...]*. Kerrville: Association for Computational Linguistics, 2017. p. 708–717.
- [23] FINKELSTEIN, M.E.; FINKELSTEIN, C. Privacidade e lei geral de proteção de dados pessoais. *Revista de Direito Brasileira*, São Paulo, v. 23, n. 9, p. 284-301, 2019.

# Desenvolvimento de um sistema de pulverização catódica com fonte de radiofrequência assistido por campos magnéticos para produção de filmes finos

Austim Mota Gomide Pimenta<sup>1</sup> e Carlos Ferreira<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Seção de Ensino de Engenharia dos Materiais – SE/8, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil,  
austimpimenta@gmail.com  
argus@ime.cb.br

**RESUMO:** Este trabalho descreve a concepção, a construção e a caracterização de um sistema de pulverização catódica com fonte de radiofrequência assistida por campos magnéticos para deposição de filmes finos. Materiais para alvo com propriedades elétricas distintas, foram usados para caracterizar o sistema: cobre, óxido de índio e dióxido de silício. Os filmes foram depositados em substratos de vidro e silício, à temperatura ambiente, com uma pressão de deposição da ordem de  $8 \times 10^{-4}$  Torr. A microestrutura dos filmes finos obtidos foi caracterizada por difração de raios x e microscopia de força atômica. As propriedades elétricas e óticas foram obtidas pelas medidas de efeito Hall e de transmitância, respectivamente. Os resultados mostraram que o sistema construído possibilita a deposição de filmes de alta qualidade e boa uniformidade de espessura. Para todos os materiais investigados, a taxa de deposição aumentou linearmente com a potência e as propriedades obtidas estavam de acordo com os valores reportados na literatura, mostrando o controle dos parâmetros de deposição no sistema construído.

**PALAVRAS-CHAVE:** Instrumentação. Pulverização Catódica. Filmes Finos. Propriedades Estruturais. Propriedades Elétricas. Propriedades Ópticas.

**ABSTRACT:** This work describes the design, construction and characterization of a radio frequency magnetron sputtering system for thin film deposition. Target-materials with different electrical properties were used for system characterization: copper, indium oxide and silicon dioxide. The films were deposited on glass and silicon substrates, at room temperature, under a pressure of  $8 \times 10^{-4}$  Torr. The microstructure of the obtained thin films was investigated by X-ray diffraction and atomic force microscopy. Electrical and optical properties were obtained by Hall effect and transmittance measurements, respectively. The results showed that the assembled sputtering system allows the deposition of high quality films with high thickness uniformity. Linear dependence of the deposition rate on the work power was achieved for the deposited films, whose properties were well consistent with those reported in the literature. These results show the control of deposition parameters in the assembled system.

**KEYWORDS:** Instrumentation. RF Magnetron Sputtering. Thin Films. Structural Properties. Electrical Properties. Optical Properties.

## 1. Introdução

Os avanços teóricos nos diversos campos da ciência, impõem a necessidade de se estabelecer o domínio das técnicas e o aprimoramento das habilidades de construção de equipamentos, de tal forma que o ramo da instrumentação científica constitui um elemento essencial para o desenvolvimento das diversas áreas da ciência. Nas últimas décadas, as técnicas de deposição de filmes finos vêm se destacando devido às suas aplicações, tanto na indústria como nos diversos campos da ciência [1]. A produção de materiais, na forma de filmes finos por pulverização catódica, se sobressai pela capacidade de fabricação de filmes finos de materiais com composições complexas, à temperatura ambien-

te, independentemente de suas propriedades elétricas, ópticas e mecânicas [2, 3, 4].

O objetivo deste trabalho, é apresentar o projeto e a construção de um sistema de deposição de filmes finos por pulverização catódica com fonte de radiofrequência assistida por campos magnéticos (RF Magnetron Sputtering), para fabricação de filmes finos. Para comprovar o sucesso do sistema construído, foram depositados filmes finos de materiais com propriedades elétricas distintas: o cobre, como material condutor elétrico, o dióxido de silício, como material isolante elétrico, e o óxido de índio, com propriedades semicondutoras. Finalmente, os filmes finos produzidos foram caracterizados para comprovar a sua qualidade e a viabilidade técnica do equipamento construído.



## 2. Materiais e Método

### 2.1 Desenvolvimento do projeto do sistema de pulverização catódica

Para a construção do projeto, foi utilizada para a câmara de deposição uma campânula cilíndrica de aço inoxidável de 30 cm de diâmetro e 30 cm de altura, evacuada por um sistema de constituído por uma bomba de difusão com armadilha criogênica para a obtenção do alto vácuo, uma bomba mecânica seca do tipo scroll para obtenção de vácuo primário, uma válvula com abertura controlada para possibilitar o controle da condutância do bombeamento durante a deposição e um conjunto de medidores de pressão. A construção do sistema de deposição projetado foi dividida em etapas:

- (i) Dimensionamento e construção de um gabinete para suporte da campânula e medidores, utilizando cantoneiras de aço carbono, e placas de alumínio para apoio dos equipamentos e seu fechamento. Uma chapa de alumínio foi colocada na parte superior do gabinete para apoio da câmara de deposição, e outra placa de alumínio foi colocada na parte inferior para apoio do sistema de bombeamento. A Figura 1 ilustra o projeto estrutural do equipamento;
- (ii) Utilização de um disco cilíndrico de aço inoxidável 306L para apoio dos componentes internos do sistema de deposição (base plate);
- (iii) Projeto do sistema elétrico de potência, de tal forma a possibilitar a alimentação independente dos equipamentos eletrônicos integrantes do sistema de deposição, e a realização de testes individuais em cada parte do sistema elétrico, tanto no sistema de bombeamento de vácuo, como nos equipamentos de rádio frequência e instrumentação;
- (iv) Redimensionamento e adaptação do sistema de vácuo pré-existente no Laboratório de Filmes Finos (LFF), do Instituto Militar de Engenharia (IME) (Figura 2);
- (v) Dimensionamento e instalação do sistema forçado de refrigeração com água fria para a bomba de difusão, e para o material alvo de deposição;
- (vi) Construção e instalação de um obturador (shutter), para proteção dos substratos durante a etapa de remoção de impurezas afixadas na

superfície do alvo, e na etapa de controle da taxa de deposição e espessura dos filmes;

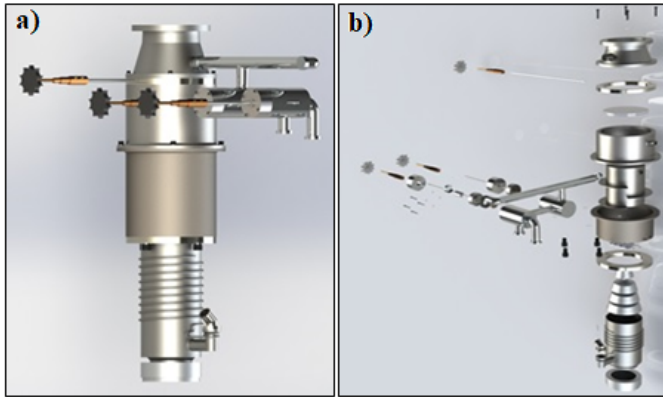
- (vii) Instalação de um porta-substrato quadrado de aço inoxidável com 10 cm de aresta, com altura regulável, para acomodar quatro substratos quadrados de 2,5 cm;
- (viii) Instalação de uma fonte de geração de radiofrequência modelo RFX 600, e de um módulo de casamento automático de impedância do conjunto substrato-catodo, modelo ATX, ambos fabricados pela Advanced Energy;
- (xix) Instalação de um catodo tipo magnetron, modelo MAK3, fabricado pela MEIVAC, que comporta alvos de 3 polegadas de diâmetro;
- (x) Instalação de um medidor de pressão de membrana capacitiva fabricado pela EDWARDS (Barocel® modelo 600A-100T-R12-N12X-4), para avaliar a pressão base do sistema, e um medidor de ionização de catodo frio fabricado pela EDWARDS (Penning®, modelo 6 D145-08-00) para avaliação do alto vácuo;
- (xi) Instalação de um medidor de pressão de membrana capacitiva fabricado pela MKS, modelo 626<sup>2</sup>01TDE, para medida de pressão durante a deposição;
- (xii) Instalação de uma válvula tipo agulha, fabricada pela Swagelok®, modelo SS-4-BK, para controle do fluxo de argônio na câmara durante as etapas de purgas e de deposição.

O sistema projetado e construído é apresentado na Figura 3.

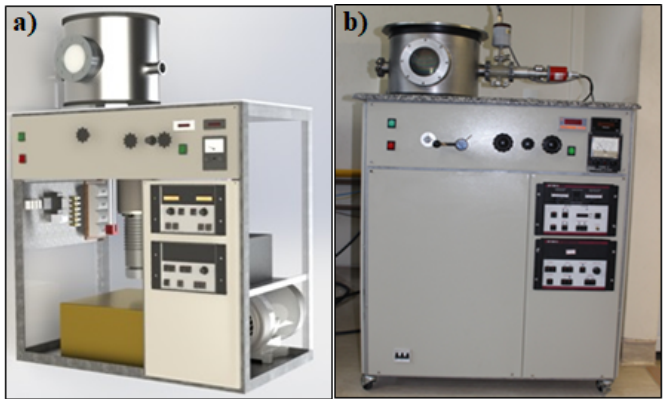
**Fig. 1 -** Representação esquemática do gabinete de suporte em vista explodida.



**Fig. 2** - a) Sistema de alto vácuo; b) Esquema do sistema de vácuo em vista explodida.



**Fig. 3** - a) Projeto do sistema de pulverização catódica; b) Fotografia do sistema de pulverização catódica construído.



2.2 Caracterização do sistema de deposição

Para caracterização do sistema de deposição construído inicialmente, foram produzidos filmes finos depositados sobre lâminas de vidro e em pastilhas de silício monocristalino.

Antes da produção das amostras, o sistema foi bombeado até a pressão-base de  $8 \times 10^{-6}$  Torr, e posteriormente, passou-se à etapa de obtenção de uma atmosfera residual de argônio. Essa etapa foi realizada com o seguinte procedimento experimental: uma primeira purga foi realizada injetando argônio na câmara de deposição elevando-se a pressão até 3 mTorr por meio da válvula agulha; a pressão foi mantida por cerca de 60s; posteriormente a pressão foi reduzida até a pressão-base fechando-se a válvula agulha;

este procedimento foi realizado pelo menos três vezes para garantir a obtenção da atmosfera residual de argônio; finalmente foi mantida a pressão em 3 mTorr para realização da deposição.

Para a produção da série completa de amostras, foram utilizados alvos de cobre, dióxido de silício e óxido de índio. Os filmes foram depositados em lâminas de vidro e com diferentes potências para caracterização do sistema de deposição. A Tabela 1 apresenta os parâmetros de deposição utilizados, mantidos constantes durante a produção dos filmes, independentemente do tipo do material alvo utilizado.

**Tabela 1** - Parâmetros mantidos constantes durante as deposições.

| Parâmetros                    | Valores                      |
|-------------------------------|------------------------------|
| Pressão base do sistema       | $\sim 8 \times 10^{-6}$ Torr |
| Pressão de abertura de plasma | 30 mTorr                     |
| Pressão de deposição          | 1 mTorr                      |
| Distância alvo-substrato      | 75 mm                        |
| Temperatura de deposição      | Ambiente                     |

Após produção dos filmes finos, foram realizadas medidas de espessura utilizando o perfilômetro marca Veeco, modelo Dektak 150, pertencente ao LFF, e o Dektak 8, da Divisão de Materiais (Dimat) do INMETRO. Para obtenção da resistividade elétrica, foi utilizado o equipamento da BioRad, modelo HL 5500, do LFF. Para caracterização estrutural dos filmes depositados, foi utilizado o difratômetro X’Pert Powder, marca PANalytical, do Laboratório de Difração de Raios X do IME. Para análise morfológica foi utilizado um microscópio de força atômica (MFA) marca Witec, modelo Alpha 300, da Dimat/INMETRO, e o microscópio eletrônico de varredura de alta resolução, modelo HELIOS NANOLAB, marca FEI, instalado no Núcleo de Microscopia do INMETRO.

3. Resultados

O alvo de cobre, foi o primeiro material utilizado para fabricação dos filmes, seguido do alvo de dióxido

de silício por possuir propriedade elétrica oposta ao cobre. O outro material utilizado para a caracterização do sistema de deposição, foi óxido de índio, por possuir característica semicondutora. As Tabelas 2 a 4 apresentam os parâmetros de deposição utilizados, com os valores obtidos de espessura, taxa de deposição e resistividade dos filmes (os filmes de  $\text{SiO}_2$  não tiveram a resistividade medida por serem isolantes).

O tempo de deposição foi mantido em 10 min, para as deposições de cobre, e 60 min, para as deposições de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{In}_2\text{O}_3$ . A pressão de deposição foi mantida em 1 mTorr para todas as deposições. Em função da característica isolante do dióxido de silício, foi necessário aplicar maiores potências para que fosse possível produzir os filmes com taxas de deposição na mesma faixa das utilizadas nos alvos de cobre e de  $\text{In}_2\text{O}_3$ .

**Tabela 2** - espessura e resistividade dos filmes finos de cobre em função dos parâmetros de deposição.

| Filme | Potência (W) | Espessura (Å) | Taxa (Å/s) | Resistividade ( $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ ) |
|-------|--------------|---------------|------------|---------------------------------------------|
| 1     | 20           | 393           | 0,7        | 0,1                                         |
| 2     | 50           | 1366          | 2,3        | 1,6                                         |
| 3     | 80           | 2445          | 4,1        | 0,6                                         |
| 4     | 110          | 3850          | 6,4        | 3,6                                         |

**Tabela 3** - espessura dos filmes finos de  $\text{SiO}_2$  em função dos parâmetros de deposição

| Filme | Potência (W) | Espessura (Å) | Taxa (Å/s) |
|-------|--------------|---------------|------------|
| 1     | 100          | 3396          | 0,9        |
| 2     | 150          | 6266          | 1,7        |
| 3     | 200          | 9125          | 2,5        |

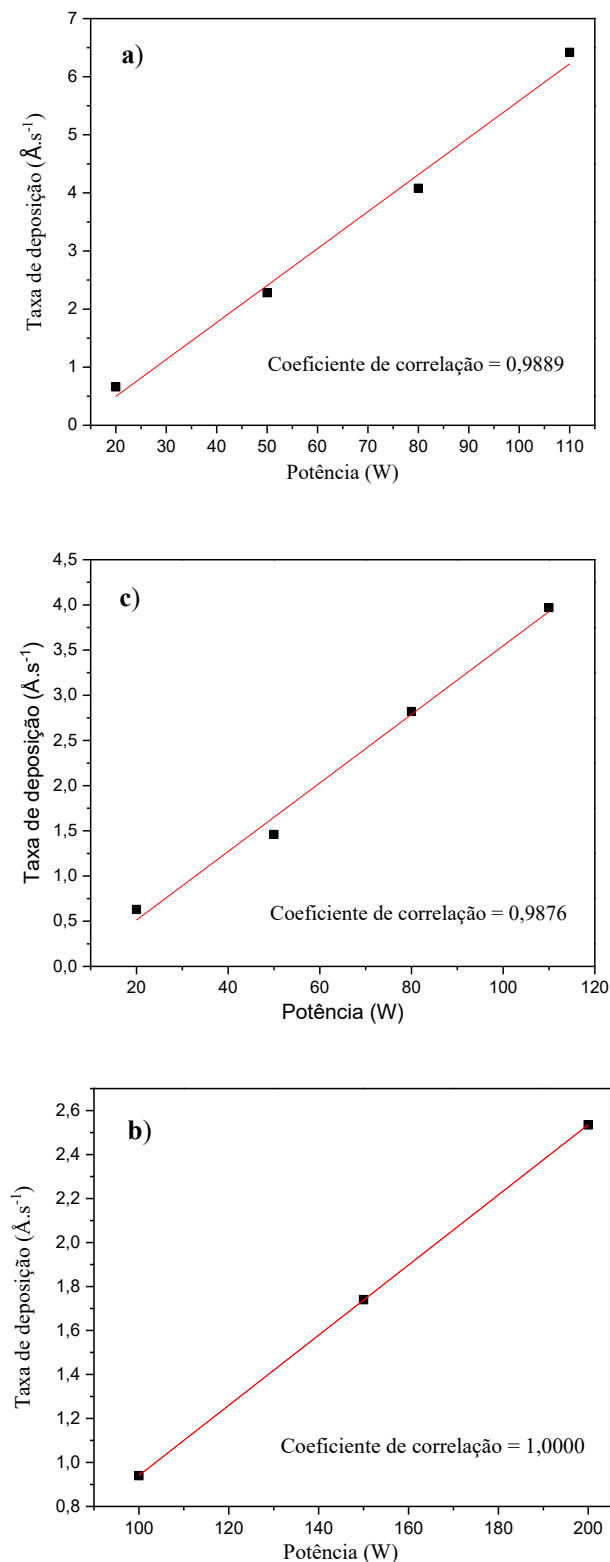
**Tabela 4** - espessura e resistividade dos filmes finos de  $\text{In}_2\text{O}_3$  em função dos parâmetros de deposição

| Filme | Potência (W) | Espessura (Å) | Taxa (Å/s) | Resistividade ( $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ ) |
|-------|--------------|---------------|------------|---------------------------------------------|
| 1     | 20           | 2265          | 0,6        | 131                                         |
| 2     | 50           | 5272          | 1,4        | 138                                         |
| 3     | 80           | 10152         | 2,8        | 195                                         |
| 4     | 110          | 14282         | 3,9        | 120                                         |

A Figura 4 mostra o comportamento da taxa de deposição em função da potência utilizada para a produção dos filmes. Analisando a Figura, é possível observar a existência de uma fortíssima correlação linear entre a

taxa de deposição dos três materiais utilizados e a potência de trabalho. Esse resultado é bem conhecido na literatura [5-7] e atesta o controle deste importante parâmetro de deposição no sistema construído.

**Fig. 4** - Taxa de deposição dos filmes finos fabricados no sistema de pulverização catódica em função da potência: a) cobre; b)  $\text{SiO}_2$  e c)  $\text{In}_2\text{O}_3$ .



A Figura 5 apresenta os difratogramas dos filmes depositados nas diferentes potências. Um ponto importante a ser destacado, é a ausência de fases contaminantes nos filmes depositados, fato que contribui para atestar a capacidade do sistema construído em depositar filmes puros e de boa qualidade.

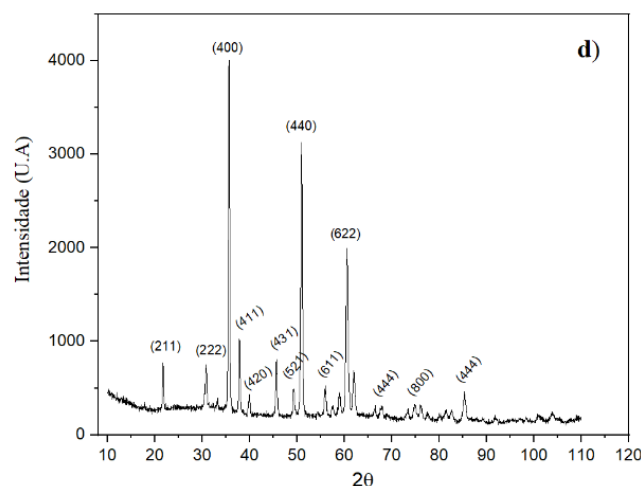
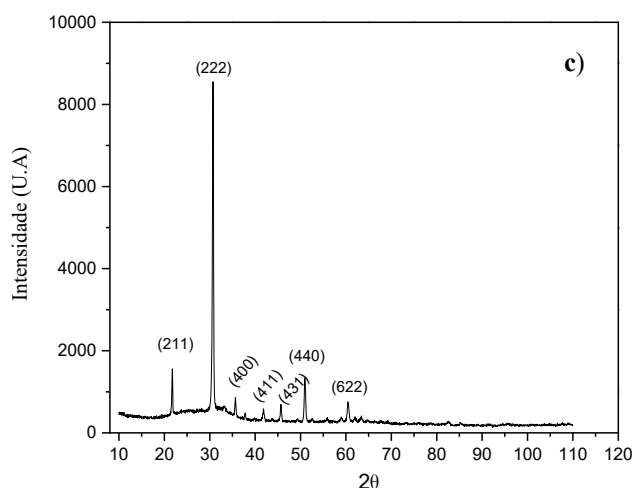
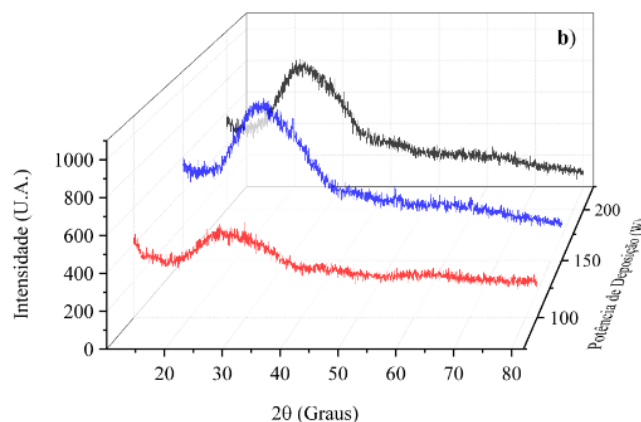
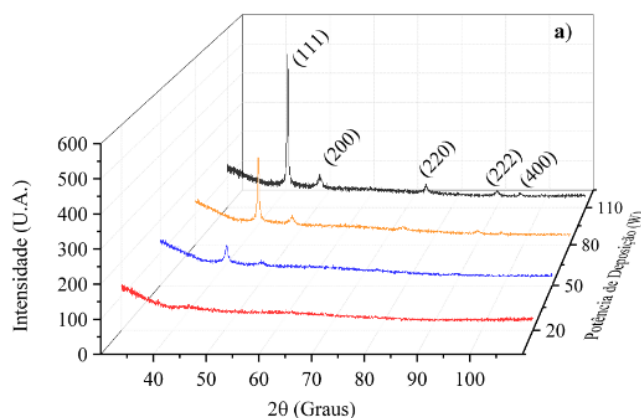
No caso dos filmes de cobre, observa-se que os filmes depositados com as potências de 50, 80 e 110W são cristalinos e apresentam um crescimento preferencial na direção (111), de acordo com a ficha cristalográfica JCPDS 00-004-0836 do cobre. Observa-se também, que o filme fino depositado com 110W apresenta maior cristalinidade que os outros, enquanto o filme fino de cobre depositado com 20W é amorfo. A cristalinidade decorrente do aumento da potência de trabalho, possivelmente está relacionada com a maior quantidade de átomos que chegam ao substrato por intervalo de tempo, favorecendo o aumento da espessura dos filmes e, conseqüentemente, a cristalinidade. A característica amorfa do filme depositado com 20 W deve-se à baixa taxa de deposição utilizada ( $0,7 \text{ \AA/s}$ ) dando origem a uma pequena espessura, quando comparada aos demais filmes.

Analisando os difratogramas dos filmes de  $\text{SiO}_2$ , é possível observar que todos os filmes são amorfos. Esse resultado é bem conhecido e está relacionado ao fato de os filmes terem sido crescidos à temperatura ambiente [8,9].

Os picos de difração dos filmes de  $\text{In}_2\text{O}_3$  foram identificados com a ficha cristalográfica JCPDS 00-006-0416. Analisando o difratograma do filme depositado com 50 W, observa-se que há uma fortíssima orientação cristalográfica na direção (222). Entretanto, o filme cresceu com 110 W apresentou maior cristalinidade com um crescimento preferencial na direção (400). Nota-se também que o aumento da potência favoreceu a cristalinidade, resultado que também é reportado por outros autores como sendo fruto da maior energia cinética das moléculas que se chocam com o substrato [9-11]. No entanto, neste trabalho, vale ressaltar que esse efeito é muito mais devido à maior espessura dos filmes depositados com maiores potências.



**Fig. 4** - Difratomogramas dos filmes finos fabricados no sistema de pulverização catódica: a) cobre; b)  $\text{SiO}_2$ ; c)  $\text{In}_2\text{O}_3$  depositado com 50W; d)  $\text{In}_2\text{O}_3$  depositado com 110W.

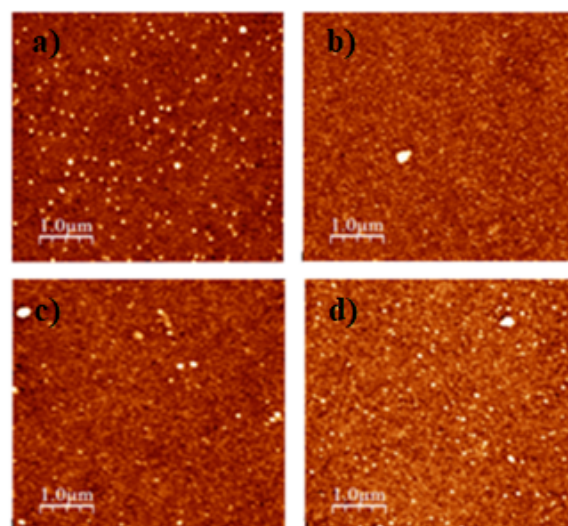


As Figuras 5 a 7 mostram imagens de microscopia de força atômica (MFA) da superfície dos filmes depositados. Os valores de rugosidade obtidos das respectivas imagens estão apresentados nas Tabelas 5 a 7.

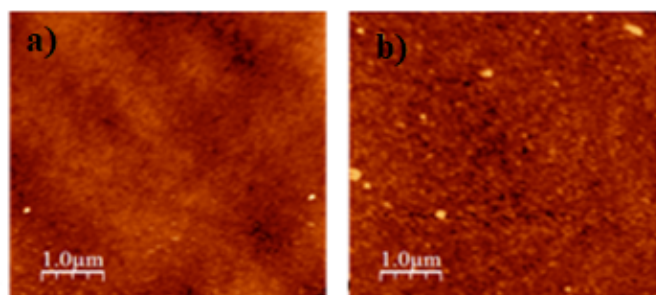
As imagens de MFA mostram que os filmes são nanométricos, sendo que há um pequeno aumento do tamanho do grão com a potência. Esse resultado está de acordo com o aumento de cristalinidade observado na Figura 4, para maiores potências de trabalho [12,13].

Quanto à rugosidade, observa-se um pequeno aumento em função da potência de deposição, fato que está relacionado à maior espessura dos filmes depositados em maiores potências.

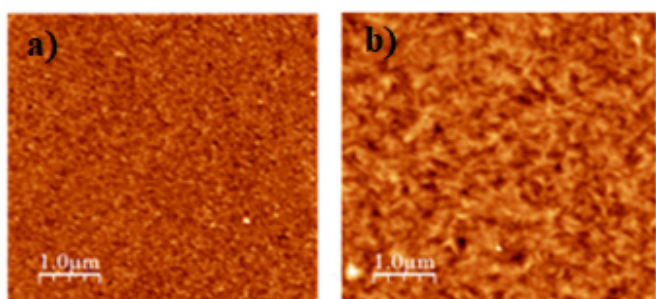
**Fig. 5** - Imagens de MFA dos filmes finos de cobre depositados com: (a) 20W; (b) 50W; (c) 80W; (d) 110W.



**Fig. 6** - Imagens de MFA dos filmes finos de  $\text{SiO}_2$  depositados com: (a) com 100W; (b) 150W.



**Fig. 7** - Imagens de MFA dos filmes finos de  $\text{In}_2\text{O}_3$  depositados com: (a) 50W; (b) 110W.



**Tabela 5** - Rugosidade dos filmes finos de cobre em função da potência de deposição.

| POTÊNCIA (W) | RUGOSIDADE (nm) |
|--------------|-----------------|
| 20           | 1,58            |
| 50           | 1,71            |
| 80           | 1,85            |
| 110          | 1,36            |

**Tabela 6** - Rugosidade dos filmes finos de  $\text{SiO}_2$  em função da potência de deposição.

| POTÊNCIA (W) | RUGOSIDADE (nm) |
|--------------|-----------------|
| 100          | 0,65            |
| 150          | 0,94            |

**Tabela 7** - Rugosidade dos filmes finos de  $\text{In}_2\text{O}_3$  em função da potência de deposição.

| POTÊNCIA (W) | RUGOSIDADE (nm) |
|--------------|-----------------|
| 50           | 0,65            |
| 110          | 0,94            |

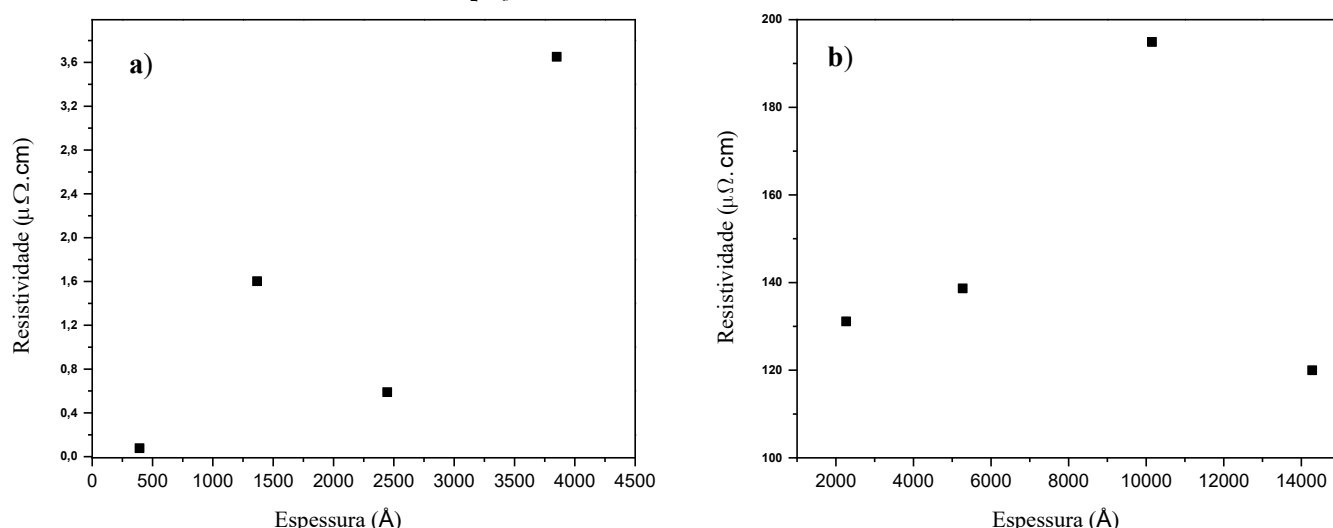
A Figura 8 apresenta a variação da resistividade dos filmes de cobre e de  $\text{In}_2\text{O}_3$  em função da potência de deposição. A resistividade dos filmes de óxido de silício não foi medida, visto que, o filme era isolante. Os valores medidos estão na mesma ordem de grandeza da resistividade reportada dos materiais:  $1,7 \mu\Omega\cdot\text{cm}$  para o cobre [14] e  $4,0 \times 10^{-4} \Omega\cdot\text{cm}$  para filmes de  $\text{In}_2\text{O}_3$  [15, 16]. Esse resultado também contribui para atestar o bom controle dos parâmetros de deposição no sistema construído.

As curvas de transmitância dos filmes de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{In}_2\text{O}_3$  depositados nas diferentes potências são apresentadas na Figura 9. Em função de o cobre ser um metal, a transmitância do filme não foi medida.

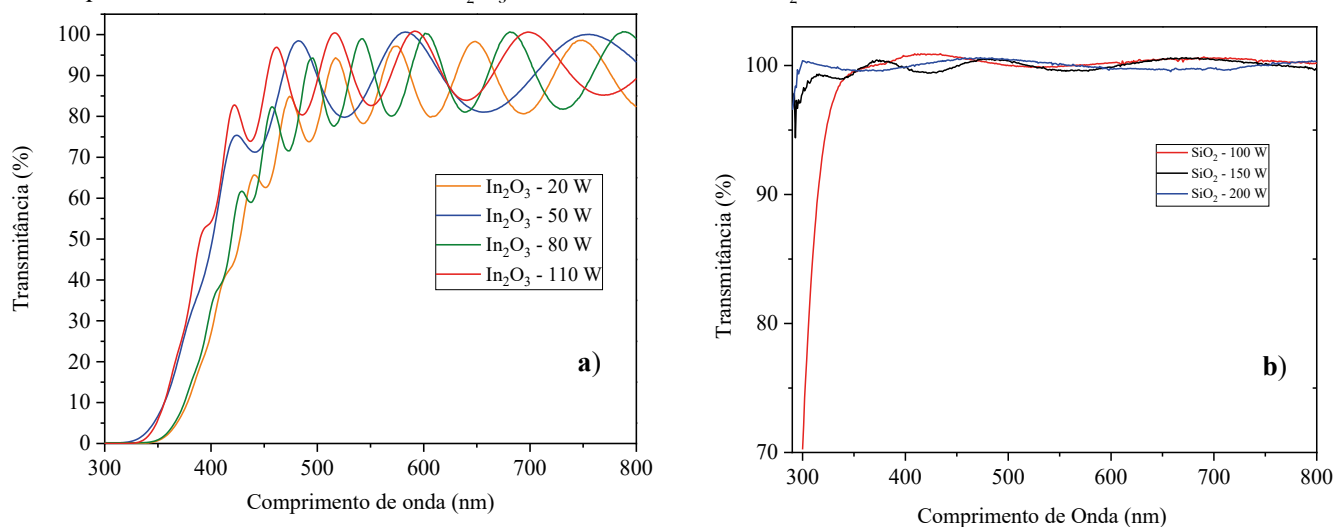
Por meio da análise dos espectros de transmitância dos filmes de  $\text{In}_2\text{O}_3$ , observa-se uma variação da posição da aresta de absorção fundamental dos filmes com a potência de trabalho. Esse resultado, é bem relatado na literatura como sendo devido à formação de vacâncias de oxigênio [17].

Analisando-se o espectro de transmitância do filme de  $\text{SiO}_2$  depositado com 100W, nota-se que seu comportamento se assemelha ao espectro da sílica com uma aresta de absorção no final do espectro visível. Esse resultado está coerente com a característica amorfa do  $\text{SiO}_2$  depositado com essa potência. Todavia, os espectros dos filmes finos produzidos com 150 e 200 W mostram que as arestas de absorção fundamental foram estendidas para a região do ultravioleta próximo, que é uma característica do  $\text{SiO}_2$  cristalino (quartzo). Esses resultados estão coerentes com a tendência à cristalização observada nas respectivas imagens de MFA da Figura 6 dos filmes depositados com potências maiores.

**Fig. 8** - Resistividade elétrica dos filmes finos fabricados no sistema de pulverização catódica em função da potência de deposição: a) cobre; b)  $\text{In}_2\text{O}_3$ .



**Fig. 9** - Espectros de transmitância dos filmes finos fabricados no sistema de pulverização catódica em diferentes potências: a) filmes finos de  $\text{In}_2\text{O}_3$ ; b) filmes finos de  $\text{SiO}_2$ .



## 4 Conclusões

Um sistema de pulverização catódica com radiofrequência e magnetos foi projetado e construído para a fabricação de filmes finos. Esse sistema encontra-se operacional nas dependências do LFF-IME, tendo já realizado mais de 60 ciclos de deposição. As deposições feitas com três alvos de

características distintas (condutor, semicondutor e isolante) forneceram filmes de boa qualidade, boa uniformidade de espessura e com propriedades semelhantes às relatadas na literatura. A taxa de deposição dos filmes variou linearmente com a potência de trabalho. Esses resultados experimentais atestam que o sistema construído fornece um bom controle dos parâmetros de deposição.

## Agradecimentos

Os autores agradecem ao Arsenal de Guerra do Rio de Janeiro – AGR e à Oficina Mecânica do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas – CBPF, pela prontidão na modelagem e usinagem de peças para a construção

do sistema de deposição. Os autores também agradecem à Divisão de Materiais do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia – INMETRO, que colaborou para a caracterização dos filmes fabricados e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pelo apoio financeiro.

## Referências

- [1] P. J. Kelly, R. D. Arnell, Magnetron sputtering: a review of recent developments and applications, *Vacuum*, Volume 56, Issue 3, 2000, 159-172.
- [2] S. Gürakar, S., H. Ot, S. Horzum, T. Serin, Variation of structural and optical properties of TiO<sub>2</sub> films prepared by DC magnetron sputtering method with annealing temperature, *Materials Science & Engineering B*, 262, 2020, 114782.
- [3] D. Depla, K. Strijckmans., R. de Gryse, The role of the erosion groove during reactive sputter deposition, *Surface & Coatings Technology* 258, 2014, 1011-1015.
- [4] L. R. Cruz, B. F. M. Lopes, R. A. Medeiros, R. M. C. Lima, C. L. Ferreira, Propriedades de filmes finos de ZnO:Al depositados sobre substratos de poliimida à temperatura ambiente para aplicações em dispositivos optoeletrônicos flexíveis. *Cerâmica*, 63 (366), 2017, 162-168
- [5] H. Horkel, J. M. Neubauer, E., C. Eisenmenger-Sittner, Construction and characterization of a sputter deposition system for coating granular materials, 84, 2010, 453-457.
- [6] M. Muralidhar Singh, G. Vijaya, M.S. Krupashankara, B.K. Sridhara, T.N. Shridhar, Deposition and Characterization of Aluminium Thin film Coatings using DC Magnetron Sputtering Process, *Materials Today: Proceedings*, 5, Issue 1, Part 3, 2018, 2696-2704.
- [7] A. Bhorde et al, (400)-Oriented indium tin oxide thin films with high mobility and figure of merit prepared by radio frequency magnetron sputtering, *Thin Solid Films*, 704, 2020, 137972
- [8] S. Karthikeyan., A. E. Hill, R. D. Pilkington, The deposition of low temperature sputtered In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> films using pulsed d.c. magnetron sputtering from a powder target, *Thin Solid Films* 550, 2014, 140-144.
- [9] P. Schurig, M. Couturier, M. Becker, A. Polity, P. Klar, Optimizing the Stoichiometry of Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Grown by RF-Magnetron Sputter Deposition by Correlating Optical Properties and Growth Parameters, *Phys. Status Solidi A* 2019, 216, 1900385.
- [10] A. Mello, “Filmes finos cristalinos de hidroxiapatita: Uma abordagem original com magnetron sputtering de Alvos Opostos”, Tese de Doutorado, Instituto Militar de Engenharia – IME, 2007.
- [11] K.H. Choi, H.C. Kang, Structural and optical evolution of Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/glass thin films deposited by radio frequency magnetron sputtering, *Materials Letters* 123, 2014, 160-164.
- [12] P. Amalathas, Amalraj & Alkaisi, Maan, Effects of film thickness and sputtering power on properties of ITO thin films deposited by RF magnetron sputtering without oxygen, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 27, 2016, 10.1007/s10854-016-5223-9.
- [13] G. Thilipan and A. Rao, Influence of power on the physical and electrical properties of magnetron sputtered gadolinium oxide thin films for MOS capacitors, *Materials Science in Semiconductor Processing* 121, 2021, 105408
- [14] H. B. Quadros, Avaliação das características resistivas de filmes finos absorvedores de radiação eletromagnética, Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Aeroespacial, Universidade Federal de Santa Catarina, 2014.
- [15] R.W. Berry, P.M. Hall, M.T. Harris, Thin films technology. 1<sup>o</sup> ed., LCCCN 68-25817, Van Nostrand Reinhold Company publication, New York, USA, 1968.
- [16] L. R. Cruz, N. B. Padilha, R. A. Medeiros, B. F. M. Lopes, R. L. M. Correia, C. L. Ferreira, R. R. Avillez, (2017). Análise comparativa das propriedades de óxidos transparentes condutores para aplicação em células solares de filmes finos de CdTe. *Matéria*, 22(1), 2017, e11793.
- [17] S. Kaleemulla, A. Sivasankar Reddy, S. Uthanna, P. Sreedhara Reddy, Physical properties of In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin films prepared at various oxygen partial pressures, *Journal of Alloys and Compounds*, Volume 479, Issues 1-2, 2009, 589-593.

# Impacto do fechamento dos aeroportos por condições meteorológicas no atraso dos voos e o custo da emissão de CO<sub>2</sub>

Reinaldo Moreira Del Fiacco<sup>1</sup>, Marcelo de Miranda Reis<sup>1</sup> e José Carlos Cesar Amorim<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Militar de Engenharia (IME)

Praça General Tibúrcio, 80, 22290-270, Praia Vermelha, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

\*reinaldo.moreira@ime.eb.br

**RESUMO:** Este artigo aborda os impactos do congestionamento e atrasos em voos comerciais, tanto para as empresas aéreas quanto para os passageiros. Além disso, destaca a relação direta entre esses custos e as emissões de gases poluentes causados pelas aeronaves na área de controle terminal em que o aeroporto está localizado. Com o objetivo de identificar gargalos operacionais e calcular o tempo de permanência das aeronaves durante condições meteorológicas adversas, o artigo propõe um método que utiliza dados coletados por meio do sistema ADS-B e cartas de navegação. O estudo também inclui uma análise bibliométrica para identificar as palavras-chave mais utilizadas na revisão bibliográfica do estudo. Por fim, é feita uma análise da emissão adicional de CO<sub>2</sub> causada pelos atrasos operacionais. Como exemplo, o estudo analisa a área terminal do Aeroporto de Viracopos em Campinas/SP e mostra que o tempo de espera resultou em 52 minutos a mais no tempo em que as aeronaves permaneceram no espaço aéreo ou 9,27 toneladas de CO<sub>2</sub> a mais emitido devido ao atraso e cancelamento dos voos. O método proposto pode ser utilizado para identificar áreas que requerem atenção para garantir a segurança e a eficiência do tráfego aéreo, especialmente em condições meteorológicas adversas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Controle do Espaço Aéreo. ADS-B. Eficiência Operacional. Atrasos de Voos. Emissões.

**ABSTRACT:** The costs of congestion or delay for airlines and passengers directly impact the means necessary for the resilience of operations and arrival at the destination. They also directly affect the emission of polluting gases caused by aircraft in the terminal control area where the airport is located. Climate predictions show a trend of worsening weather conditions favorable to air operations. This article aims to develop a method for identifying operational bottlenecks and calculating the time aircraft spend in a specific airspace control area during adverse weather conditions. For this purpose, data collected through the ADS-B system and airspace division published on navigation charts will be used. In addition, the article includes a bibliometric study to identify the most used keywords in the literature review. Finally, an analysis of additional CO<sub>2</sub> emissions caused by operational delays will be performed. In the case of the terminal area of Viracopos Airport in Campinas/SP, the results show that the waiting time resulted in 52 minutes more time that the aircraft remained in the airspace or 9.27 tons of additional CO<sub>2</sub> emitted due to flight delays and cancellations.

**KEYWORDS:** Air Traffic Control. ADS-B. Operational Efficiency. Flight Delay. Emissions.

## 1. Introdução

Em uma via aérea, a capacidade é restringida quando há um aumento na densidade do tráfego. Scarpel e Pelicioni [1] afirmam que em todo globo o aumento do movimento de aeronaves está atingindo a capacidade dos aeroportos de absorverem a demanda. Mesmo após a pandemia de covid-19, a Associação Internacional do Transporte Aéreo (IATA) [34] espera que ao final de 2023 o movimento global de aeronaves tenha atingido 103% do tráfego em relação a 2019. E a situação da capacidade operacional piora quando há restrições por condições meteorológicas, sendo essa uma tendência ainda para esta década, de acordo com Lui *et al.* [22].

O custo desse congestionamento ou atraso para empresas aéreas e passageiros incide diretamente nos meios necessários para a resiliência das operações e da chegada ao destino [1].

A Instrução do Comando da Aeronáutica (ICA) 100-12 Regras do Ar define uma Área de Controle Terminal (TMA) como um Espaço Aéreo Controlado no qual, dentro de sua dimensão, é prestado o Serviço de Tráfego Aéreo (ATS) de aproximação e chegada para as aeronaves nas imediações de um ou mais aeródromos [30]. No Brasil, é administrado pelo Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), órgão ligado ao Comando da Aeronáutica e Ministério da Defesa. A dificuldade do controle de uma TMA é que as aeronaves estão voando baixo,



com velocidades baixas, próximas umas das outras, executando diferentes tipos de procedimentos e em diferentes rotas, o que causa um aumento da carga de trabalho do controlador de voo e da atenção dos pilotos. Enfim, quando há uma condição de mau tempo meteorológico ou outro evento de interrupção operacional no(s) aeródromo(s) da imediação da TMA [25], isso significa que as aeronaves estarão por mais tempo recebendo o controle de tráfego aéreo, sendo no chamado procedimento de espera ou reduzindo a velocidade, gerando então o aumento de diversos custos operacionais, sendo um deles o da emissão de gases poluentes.

Existem diversas pesquisas relacionadas à otimização da performance do Sistema de Controle do Espaço Aéreo Brasileiro (SISCEAB), assim como de outros países, que visam ao desenvolvimento de rotas mais diretas e à demanda do setor (capacidade), cuidado para evitar áreas residenciais que aumentem a poluição sonora, previsibilidade, capacitação, infraestrutura técnica, segurança operacional e o custo-benefício ([3], [4], [1], [4], [6], [10], [11], [14], [16], [18], [19], [28], [29]). Ou seja, o Controle de Tráfego Aéreo é um tema amplamente debatido, principalmente porque há um conjunto de regras e circunstâncias que aumentam ainda mais a complexidade do transporte aéreo, e que pioram quando encontram condições não controladas pelo homem, como a meteorológica.

Por outro lado, ainda existe uma dificuldade na obtenção e na qualidade dos dados ofertados sobre a movimentação das aeronaves. As empresas aéreas interessadas na otimização de sua malha operacional e, por consequência, na redução de custos, investem na Garantia da Qualidade Operacional de Voo (ou *Flight Operational Quality Assurance* – FOQA), geralmente aplicado dentro do setor de engenharia que abrange um conjunto de métodos de monitoramento, análise e simulação com dados obtidos dos gravadores de dados do voo (FDR, acrônimo em inglês para *Flight Data Recorder*) ([40], [41]). Porém, os dados obtidos são majoritariamente utilizados para a previsão de gastos com manutenção e segurança operacional, e não há o compartilhamento desses dados, já que tais informações poderiam ser utilizadas por outras empresas em

modelagens estatísticas para obterem vantagens sobre a precificação de suas passagens aéreas [41]. De forma específica, o *software* Makron Platao® da Atech®, uma das empresas do Grupo Embraer™, responsável pelo fornecimento dos sistemas que atendem o Controle do Espaço Aéreo Brasileiro, é capaz de simular diversos cenários para fins de treinamentos, mas não de identificar a partir de um cenário real o tempo de atrasos e outras informações estatísticas. Além disso, os dados obtidos pelo sistema Sagitario® de controle de tráfego aéreo não são disponibilizados, servindo para uso tático e geração de relatórios para verificação de capacidade de congestionamento e saturação pós-operacional do Centro de Gerenciamento da Navegação Aérea (CGNA) [42]. Já a Agência Nacional de Aviação Civil (Anac) disponibiliza informações sobre percentual de atraso e cancelamento de voo, com base no horário previsto para o início do voo, horário real de início do voo, horário previsto para pouso e horário real de pouso [35], sem informações em relação a rota, em qual momento do voo houve atraso operacional e performance das aeronaves.

Publicamente, está disponível a captação de dados de voo (*timestamp*, o horário UTC, *callsign*, posição, altitude, velocidade e direção) que são transmitidos por meio de dispositivos de um Sistema de Vigilância Aérea Automático Dependente por Radiodifusão (ADS-B, acrônimo em inglês para *Automatic Dependent Surveillance-Broadcast*) acoplado nas aeronaves comerciais e algumas poucas aeronaves da aviação geral. Esses dados podem obtidos pelos receptores de desenvolvimento próprio ou por meio de empresas que comercializam essas informações, como a FlightRadar24™ e a FlightAware™.

Visto isso, há a oportunidade de desenvolver um método para verificação de gargalos operacionais e o tempo de permanência das aeronaves em determinada área de controle do espaço aéreo, utilizando dados obtidos por meio do ADS-B e da divisão do espaço aéreo publicado em cartas de navegação, quando há condições de tempo meteorológico ruim, sendo esse o objetivo deste artigo. Adicionalmente, apresentamos um estudo bibliométrico por meio de uma análise de ocorrência simultânea, para verificar quais são as

palavras-chaves mais utilizadas e suas relações na revisão bibliográfica para este estudo. Por último, também será analisado qual é a emissão adicional de CO<sub>2</sub> causada devido aos atrasos operacionais. Pejovic *et al.* [10], em seu estudo sobre o Aeroporto de Heathrow em Londres, também atestam a falta de informações de fechamento por condições meteorológicas por parte do aeródromo ou da agência reguladora inglesa.

O estudo será aplicado na área terminal do Aeroporto de Viracopos, em Campinas/SP, sendo esse o quarto aeroporto do Brasil com maior número de pousos e decolagens, por ser um aeroporto aliviador e de alternativa de Congonhas, Guarulhos e Belo Horizonte. Além disso, nos últimos 5 anos (2017-2022) os voos de destinos a SBKP tiveram média 5.000 voos mensalmente, e com uma média de atrasos superiores a 30 minutos, 6,05%, atrasos superiores a 60 minutos de 2,52% e média de cancelamentos de 3,23% [35].

Enfim, o congestionamento do Espaço Aéreo, seja por condições meteorológicas ou por qualquer outro motivo, implica também no custo de defesa que necessitará de investimento em pessoal e modernização dos procedimentos e materiais para o reequilíbrio do setor, assim como aconteceu no evento que ficou conhecido como Apagão Aéreo de 2006 [39].

## 2. Revisão bibliográfica

### 2.1 Da revisão bibliométrica

Conforme Carvalho *et al.* [16], os atrasos dos voos retornam problemas econômicos significantes para a sociedade, sendo, então, este tema frequente na literatura científica do transporte aéreo e o que torna necessário fazer uma revisão sistemática sobre o assunto.

A partir do termo *weather conditions affect airports operation* na base do ScienceDirect®, foram encontrados 5.377 resultados relacionados a artigos de pesquisa, sendo 400 artigos analisados para esta revisão bibliográfica. Desses, por meio de uma análise empírica dos autores, 28 ([1], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17], [18], [19], [20], [21], [22], [23], [24], [25], [26], [27], [28], [29]) são cor-

relatos ao objetivo desta pesquisa. Foi realizada uma revisão bibliométrica com a análise de coocorrências, utilizando o VOSviewer®. Esse *software* permite que sejam visualizadas as relações das palavras-chaves dessas publicações, para que, então, esta revisão bibliográfica pudesse ser guiada com a utilização desses resultados na pesquisa.

Para Marques *et al.* [2], a análise de concorrência é um método quantitativo de palavras-chave catalogadas a partir da teoria de grafos, com um conjunto de objetos que se repetem em diferentes fontes.

Com esse *software*, foram extraídas duas visualizações e nelas foram geradas 79 relações entre as palavras-chaves, em 6 conjuntos. A Figura 1 mostra o resultado dessa análise com a visualização por rede.

No conjunto 1 estão as palavras-chaves *airport*, *aircraft engines*, *air pollutants*, *aviation emissions* e *air quality*, no qual a palavra que mais se repete entre as pesquisas com é *airport*; por isso, essa palavra aparece mais entre as palavras-chaves, assim como entre todas as palavras-chaves das referências bibliográficas. No conjunto 2, a palavra-chave que mais se repete é *climate change*, que se relaciona com as palavras *airport closure*, *London Heathrow*, *weather delay*, *sustainable development* e *disaster risk*. No conjunto 3, *resilience* aparece como a mais repetida e que se relaciona com *severe weather event*, *aviation*, *modal substitution* e *delay*. No conjunto 4 a palavra que mais ocorre é *risk assessment*, relacionada com *urban clusters*, *China*, *location selection* e *environmental risks*. Já no conjunto 5, com a palavra *efficiency* aparece *performance*, *seaport*, *privatization* e *developing countries*. Por fim, no conjunto 6 está *disruptive weather*, com as palavras-chaves *sea-level rise* e *adaptation*.

A Figura 2 mostra o resultado por visualização da ocorrência por sobreposição no

qual é mostrada pelo ano em que as palavras-chaves são encontradas nas publicações. Ela mostra que as palavras relacionadas com meteorologia, qualidade do ar e resiliência são mais recentes.

Carvalho *et al.* [16] realizou uma revisão sistemática sobre a relevância da pesquisa de atrasos de voos, identificando os principais métodos utilizados entre 123 artigos. Foi constatado que, entre 2001 e 2013,

era mais aplicado o uso de estatística descritiva e modelos de regressão. De 2013 a 2017 passaram a ser aplicados métodos de análise de rede. E de 2017 até 2019 foram identificados mais estudos utilizan-

do aprendizagem das máquinas. Esses autores concluem que há uma tendência de evolução de modelos híbridos para análises prescritivas e preditivas do transporte aéreo.

**Figura 1** - Resultado das ocorrências das palavras-chaves.



VOSviewer

## 2.2 Dos efeitos operacionais durante condições meteorológicas adversas

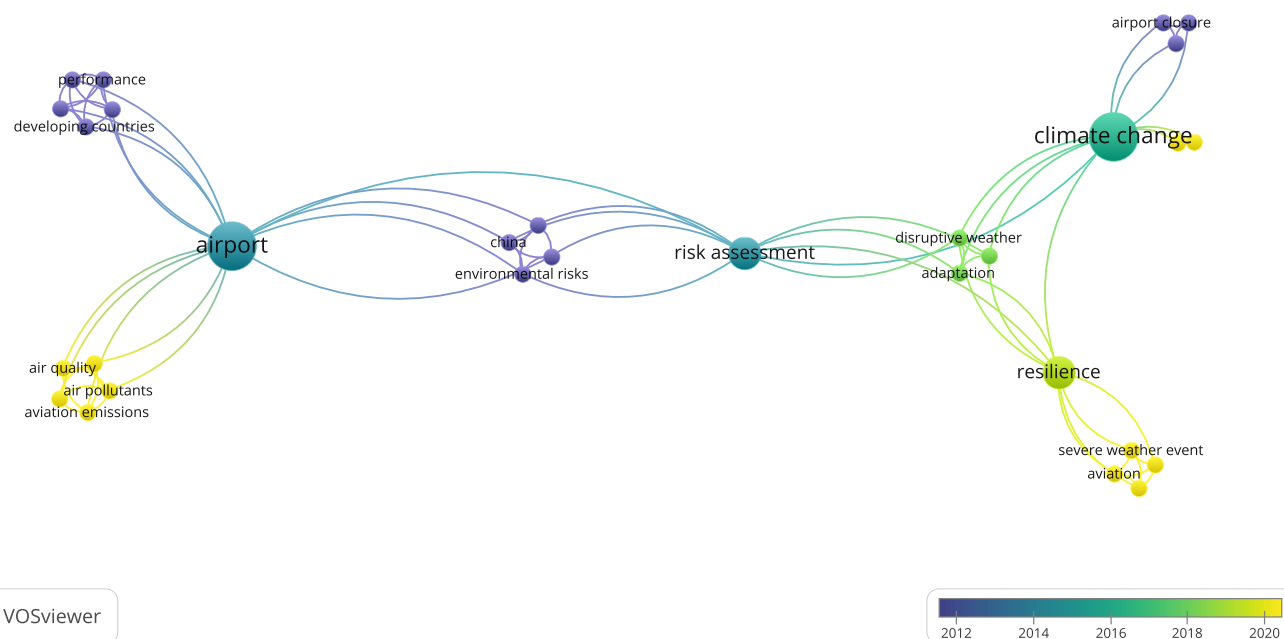
O congestionamento dos aeroportos é causado por condições meteorológicas ruins, falta de capacidade da infraestrutura aeroportuária, aumento da demanda pelo transporte aéreo e o tempo perdido na espera entre os procedimentos de pouso e decolagem [1] [4] [16] [10].

Uma boa prática do órgão que presta serviço de tráfego aéreo é fazer diariamente uma análise da previsão das condições meteorológicas e do movimento do tráfego aéreo. Essa prática é chamada na literatura de *Early Warning Model* (EWM) [1] [17] [18]. No Brasil, ela faz parte do Gerenciamento do Fluxo do Tráfego Aéreo, prestado pelo Centro de Gerenciamento da Navegação Aérea (CGNA) do Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA) [31]. O EWM consiste numa análise de regressão que projeta a quantidade de movi-

mentos diários para que sejam tomadas medidas como quantidade de pessoal empregado no controle de tráfego aéreo, nos aeroportos e na escala da tripulação de voo nos aeroportos em que o tempo estará ruim e nos que podem receber voos como alternativa.

Postorino *et al* [4] utilizaram modelos de simulação de eventos discretos, com base no *software* AnyLogic™, para estimar os eventos inesperados, em magnitude e duração, que afetam as operações de um aeroporto, avaliando a dinâmica de cada processo e o impacto dele dentro do sistema de transporte, que é dinâmico e estocástico. Os autores descrevem a dinâmica do transporte aéreo em duas camadas. A primeira seria uma atividade isolada com determinada performance, e a segunda seria o *output* da primeira camada conectando com todo o sistema, mostrando como a propagação de atividades eficientes e ineficientes fazem parte do resultado que representa o sistema.

**Figura 2** - Resultado das ocorrências das palavras-chaves por ano da publicação.



Como estudo de caso, os autores utilizaram o aeroporto de Bologna, na Itália. Com capacidade de 24 movimentos por hora, aberto 24 horas, esse aeroporto recebe em média 107 pousos e 109 decolagens por dia.

O estudo considerou a chegada e a partida de 20 voos por hora, pegando dados reais do FlightRadar24™, e considerou a capacidade do aeroporto em relação a quantidade de escadas, caminhões de *catering*, água, limpeza, combustível e transporte de bagagens, e tratantes para *pushback*, a fim de encontrar a quantidade de voos que atrasariam, o total e a média do atraso para a decolagem e a variação do tempo entre a chegada e a saída da aeronave no aeroporto. Como resultado de 20 rodadas de simulação randômica, os autores constataram que, com os diferentes eventos de interrupção, 50% dos voos partiriam com atraso, 11,5% partiriam com mais de 1,5 hora de atraso, e uma aeronave partiria com mais de 4 horas de atraso. Os autores sugerem que novos estudos possam estimar o impacto ambiental com a emissão de CO<sub>2</sub> e ruído, e como esse impacto seria sentido por diferentes *stakeholders*.

Com o objetivo de tornar mais acurada a previsão meteorológica nos aeroportos, Larraondo *et al* [7] desenvolveram novo método de análise com inteligên-

cia das máquinas por meio da Predição Numérica de Tempo (NWP, no acrônimo em inglês). O algoritmo de seu modelo foi desenvolvido em Python e está disponível como *software* livre no repositório do GitHub™ do autor (<https://github.com/prl900/AeroCirTree>).

Esse sistema faz uso do banco de dados da National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), buscando informações meteorológicas do Sistema de Previsão Global e do banco de dados do Código METAR distribuído pela WMO Global Telecommunication System (GTS). Como cenário, utilizaram os aeroportos de Berlin Tegel (EDDT), Heathrow (EGLL), Barcelona (LEBL), Charles de Gaulle (LFPG) e Milano Malpensa (LIMC), utilizando 8.760 informações METAR de cada aeroporto nos anos 2011, 2012 e 2013. Para comparar a eficácia do método, utilizaram os métodos de previsão linear e de regressão circular em árvore conhecido como Método Lund. Os resultados revelam que o método proposto por Larraondo *et al* [7] se mostra mais eficaz a longo prazo, sendo que o método linear é mais eficaz a curto prazo, ajustando-se em pequenas variações a longo prazo; já o Método Lund a médio prazo se apresenta mais vantajoso do que a aprendizagem de

máquinas criada pelos autores para a acurácia da previsão meteorológica nos aeroportos.

Para encontrar o impacto meteorológico na performance dos pousos para os voos domésticos no Brasil, Oliveira [11] utilizou do histórico de voos planejados e realizados, dados meteorológicos e estimaram por um modelo logit para analisar como as diversas condições meteorológicas afetam a probabilidade dos atrasos dos voos. Os resultados mostram que há uma evidência significativa sobre o atraso dos voos por eventos meteorológicos, mas condições de visibilidade e teto resultaram em coeficiente negativo, já condições como chuva e rajadas de vento são mais significativas para os atrasos.

### 3. Método

#### 3.1 Obter informações do horário do fechamento do aeródromo

Para atingir o objetivo, o primeiro passo é encontrar quais foram os horários em que o aeroporto esteve fechado por condições meteorológicas adversas. Por meio da API da REDEMET, um serviço de prestação de informações meteorológicas do DECEA [32], é possível obter o histórico do Código METAR, que traz informações sobre dia, data, horário, aeroporto, velocidade e intensidade do vento, visibilidade vertical, nebulosidade e altura das nuvens, tempo presente, fenômenos de tempo presente, de temperatura do ar e do ponto de orvalho, e a pressão atmosférica no local em hPa. A seguir, há um exemplo de Código METAR do Aeroporto de Viracopos (SBKP), em Campinas/SP. A decodificação é feita através da ICA 105-16 [33].

2022081003 - METAR SBKP 100300Z 02008KT 7000 -RA BKN007 OVC013 18/17 Q1017=

No código METAR mostrado a informação é de 10 de agosto, referente a 3 horas no horário de Greenwich (Z), o vento é de 020° com 08 kt de intensidade, visibilidade de 7 mil pés, com chuva diminuindo (-RA), nublado (BKN) a 700 pés, encoberto (OVC) a 1.300 pés, com temperatura do ar de 18°C e temperatura do ponto de orvalho de 17°C, e a pressão para ajuste do altímetro, de 1017 hPa.

Para encontrar quais foram as horas em que o aeroporto esteve fechado e fazer a estatística descritiva da soma desses resultados, foi desenvolvido um algoritmo em Python (*vide* apêndice) que informasse o tempo (*timestamp*) em que o aeródromo não operou em Regra de Voo Visual (VFR), VFR Especial, procedimentos sob Regra de Voo por Instrumento, operação ILS, LNAV, LNAV (Performance A e B), LNAV Performance C e D, e RNP 0.3. A restrição da visibilidade para cada um desses tipos de procedimento depende das normas do tráfego aéreo e do que está publicado nas cartas de aproximação e decolagem de cada aeródromo.

#### 3.2 Delimitação do espaço aéreo e dados de voos

Segundo Campos [37], para amostragem estatística em pesquisas de transportes, o melhor dia da semana a ser observado é quinta-feira. Dessa forma, esse foi o dia escolhido para os cálculos, após obter os resultados dos horários dos fechamentos do aeródromo. A partir de então, os arquivos em kml e csv para cada voo realizado numa quinta-feira seriam obtidos na plataforma FlightRadar24<sup>TM</sup>. Esses arquivos fornecem as informações de *timestamp*, o horário UTC, *callsign*, altitude, velocidade e direção, sendo então possível calcular o tempo percorrido da aeronave na entrada da área da TMA até o toque final da pista.

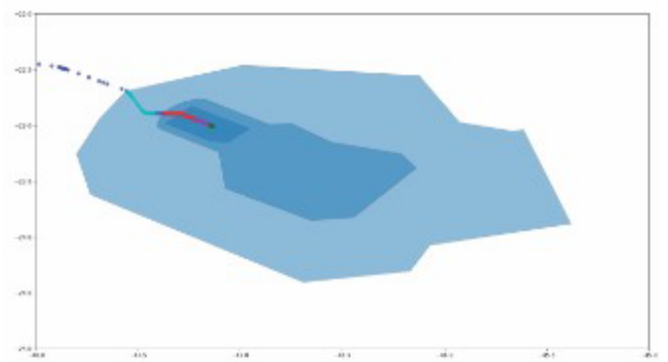
O DECEA [34] publica os dados dos Planos de Voos Repetitivos, no qual são mostrados quais foram os voos programados para determinado dia. Com essa informação, comparou-se os voos programados em um dia em que não houve o fechamento do aeródromo, por questões meteorológicas, com um dia em que houve o fechamento, podendo assim estimar a diferença de tempo em que as aeronaves permaneceram até a saída da área terminal, após a decolagem, ou até o pouso.

As delimitações do espaço aéreo em formato csv foi obtida no diretório GEOAISWEB, que é mantido pelo DECEA. Alternativamente, poderia ser obtida por meio de uma Carta de Rota (ENRC). Tendo as coordenadas dos vértices da área e as altitudes em relação ao nível do mar, foi possível reproduzir o espaço geográfico por meio do segundo algoritmo desenvolvido (*vide* repositório <https://github.com/embarquetec/adatfm>).



Esse algoritmo faz a importação da trajetória do voo e identifica o momento em que a aeronave passa por uma das arestas do mapa gerado. Depois, faz-se a subtração do tempo voado entre cada zona do espaço aéreo. A Figura 3 mostra as delimitações no espaço aéreo e a trajetória do voo. A Tabela 1 mostra os *outputs* gerados para determinar o momento em que a aeronave passa por cada zona do espaço aéreo ou fase do voo, por exemplo, decolagem, cruzeiro, descida e pouso. Os resultados mostram também um erro, que é uma correção para mais que corresponde o tempo para a captação das informações da posição da aeronave pelo sistema Automatic Dependent Surveillance – Broadcast (ADS-B) – e a confirmação da posição da aeronave. Esses tempos são subtraídos do tempo total.

**Figura 3 -** Reprodução da limitação do espaço aéreo com a trajetória de voo da aeronave.



**Tabela 1 -** Saídas de identificação dos voos

| Outputs                   | Descrição                           |
|---------------------------|-------------------------------------|
| <i>code</i>               | Código IATA de identificação do voo |
| <i>departure_iata</i>     | Código IATA do aeroporto de partida |
| <i>arrival_iata</i>       | Código IATA do aeroporto de destino |
| <i>takeoff_time</i>       | Hora da decolagem                   |
| <i>takeoff_time_error</i> | Erro do horário da decolagem        |

| Outputs                                     | Descrição                                                             |
|---------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| <i>level_off_time</i>                       | Hora em que atinge o nível de cruzeiro                                |
| <i>level_off_time_error</i>                 | Erro do horário em que atinge o nível de cruzeiro                     |
| <i>descent_init_time</i>                    | Hora em que se inicia a descida da fase de cruzeiro                   |
| <i>descent_init_time_error</i>              | Erro da hora em que se inicia a descida da fase de cruzeiro           |
| <i>touchdown_time</i>                       | Hora do pouso                                                         |
| <i>touchdown_time_error</i>                 | Erro da hora do pouso                                                 |
| <i>flight_time</i>                          | Tempo total de voo                                                    |
| <i>flight_time_error</i>                    | Erro no tempo total de voo                                            |
| <i>before_takeoff_ground_duration</i>       | Tempo em que a aeronave permaneceu em solo antes da decolagem         |
| <i>before_takeoff_ground_duration_error</i> | Erro no tempo em que a aeronave permaneceu em solo antes da decolagem |
| <i>climb_duration</i>                       | Tempo de duração da subida                                            |
| <i>climb_duration_error</i>                 | Erro no tempo de duração da subida                                    |
| <i>cruise_duration</i>                      | Duração do tempo de voo em cruzeiro                                   |
| <i>cruise_duration_error</i>                | Erro na duração do tempo de voo em cruzeiro                           |
| <i>descent_duration</i>                     | Duração da descida                                                    |
| <i>descent_duration_error</i>               | Erro no tempo de duração da descida                                   |
| <i>after_landing_ground_duration</i>        | Tempo de táxi após o pouso                                            |
| <i>after_landing_ground_duration_error</i>  | Erro no tempo de táxi após o pouso                                    |
| <i>air_space_1_entry</i>                    | Hora de entrada no espaço aéreo                                       |

| Outputs                                     | Descrição                                                            |
|---------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| <i>air_space_1_entry_error</i>              | Erro na hora de entrada no espaço aéreo                              |
| <i>air_space_1_exit</i>                     | Hora da saída do espaço aéreo                                        |
| <i>air_space_1_exit_error</i>               | Erro na hora de saída do espaço aéreo                                |
| <i>inside_air_space_1</i>                   | Tempo dentro do espaço aéreo                                         |
| <i>inside_air_space_1_error</i>             | Erro no tempo dentro do espaço aéreo                                 |
| <i>total_time_inside_air_space</i>          | Tempo de voo dentro das seções de espaço aéreo selecionados          |
| <i>total_aircraft_fuel_inside_air_space</i> | Combustível total dentro do espaço aéreo selecionado                 |
| <i>total_passenger_CO2_inside_air_space</i> | Total de CO <sub>2</sub> emitido dentro do espaço aéreo selecionado  |
| <i>total_cost_CO2</i>                       | Custo total do CO <sub>2</sub> emitido de acordo com a cotação atual |

Para encontrar o custo total do CO<sub>2</sub> emitido de acordo com a cotação atual, utiliza-se o valor de mercado de R\$ 383,62 a tonelada, considerando o fechamento do mercado futuro em 1 de novembro de 2022 [38].

### 3.3 Cálculo da emissão de poluentes

O cálculo da emissão de CO<sub>2</sub> utiliza a API da Organização da Aviação Civil Internacional (OACI) [38] para o cálculo da emissão individual do passageiro. Esse método utiliza uma variável fixa multiplicando pelo total de combustível com o fator de carga para passageiro dividido pelo número de assentos para a categoria econômica (Y) com o fator de quantidade de passageiros estipulado para cada continente.

$$CO_2 \text{ per pax} = 3,16 \times \frac{(tf \times pfc)}{(nys \times plf)} \quad (1)$$

Sendo:

- = Total de combustível;
- = Fator de carga para passageiro;
- = Número de assentos para a categoria Y;
- = Fator de quantidade de passageiros por região.

Os valores do total do combustível consumido em cada trecho voado são obtidos por meio do retorno da API da OACI [38]. Para isso, é utilizada a média do histórico de todos os voos das companhias aéreas que repassam essa informação ao Bando de Dados da ANAC.

## 4. Estudo de caso

O cenário escolhido foi o do Aeroporto Internacional de Campinas/Viracopos (SBKP). Campinas é o quarto aeroporto do Brasil com maior número de pousos e decolagem, com 109.230 movimentos registrados no final de 2022, perdendo para Guarulhos (192.280 movimentos), Congonhas (130.820 movimentos) e Brasília (117.736 movimentos) [36]. A cidade de Campinas está localizada numa região serrana, além dos rios Capivari, Jaguari, Capivari-Mirim e Atibaia, que favorecem as condições para formação de aglomerado de gotículas d'água que ficam em suspensão na atmosfera. É esse nevoeiro que restringe a visibilidade para pousos e decolagem, causando atrasos e cancelamentos.

Segundo dados da Anac [35] de percentuais de voos atrasados e cancelados como origem em SBKP de dezembro de 2017 até setembro de 2022, mensalmente são, em média, 5.027 voos, com média de atrasos superiores a 30 minutos; de 7,03%, com atrasos superiores a 60 minutos; de 2,36% e com média de cancelamentos de 2,81%. Como voos de destinos a SBKP, temos em média 5.000 voos, com média de atrasos superiores a 30 minutos, com 6,05%; atrasos superiores a 60 minutos, com 2,52% e média de cancelamentos de 3,23%.

### 4.1 Dados do fechamento do aeródromo

A Tabela 2 mostra as restrições por teto de nuvens e de visibilidade para a operação por regra de voo e tipo de procedimento.

**Tabela 2** - Condições de operação por regra de voo e procedimento para o Aeroporto de Viracopos

| Procedimentos            | Condições                 |
|--------------------------|---------------------------|
| VFR                      | Teto > = 1.500 ft         |
|                          | Visibilidade > = 5.000 ft |
| VFR Especial             | Teto > = 1.000 ft         |
|                          | Visibilidade > = 3.000 ft |
| ILS                      | Teto > = 200 ft           |
|                          | Visibilidade > = 800 ft   |
| LNAV                     | Teto > = 357 ft           |
|                          | Visibilidade > = 1.100 ft |
| LNAV (Performance A e B) | Teto > = 430 ft           |
|                          | Visibilidade > = 800 ft   |
| LNAV (Performance C e D) | Teto > = 430 ft           |
|                          | Visibilidade > = 1.500 ft |
| RNP 0.3                  | Teto > = 339 ft           |
|                          | Visibilidade > = 1.000 ft |
| RNP 0.15                 | Teto > = 0 ft             |
|                          | Visibilidade > = 0 ft     |

Foram estipulados os dias 15 e 22 de setembro de 2022. A Tabela 3 mostra a quantidade de horas em que o aeródromo não operou para cada tipo de procedimento.

**Tabela 3** - Tempo que cada procedimento permaneceu indisponível para operação

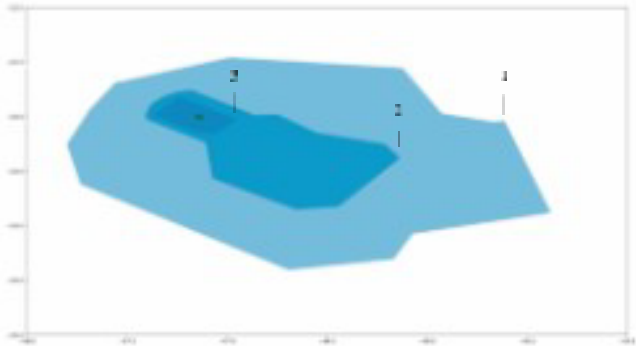
| Procedimento             | Tempo (hr) dia 15/09 | Tempo (hr) dia 22/09 |
|--------------------------|----------------------|----------------------|
| VFR                      | 00:00                | 18:00                |
| VFR Especial             | 00:00                | 08:33                |
| ILS                      | 08:00                | 04:48                |
| LNAV                     | 00:00                | 03:00                |
| LNAV (Performance A e B) | 00:00                | 03:33                |

| Procedimento             | Tempo (hr) dia 15/09 | Tempo (hr) dia 22/09 |
|--------------------------|----------------------|----------------------|
| LNAV (Performance C e D) | 00:00                | 03:33                |
| RNP 0.3                  | 00:00                | 3:00                 |
| RNP 0.15                 | 16:00                | 21:12                |

4.2 Delimitação do espaço aéreo e dados de voos

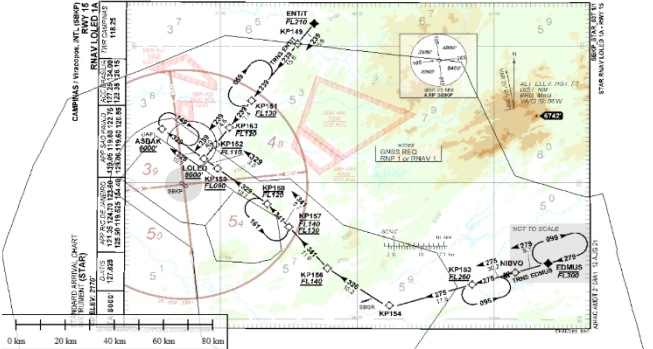
Para os procedimentos de pouso e decolagem no Aeroporto de Viracopos, as aeronaves passam pela CTR Campinas (3), pela TMA São Paulo 2 (2) e TMA São Paulo 1 (1). A Figura 4 mostra as seções dos espaços aéreos delimitados para este estudo.

**Figura 4** - Delimitação do espaço aéreo do estudo.

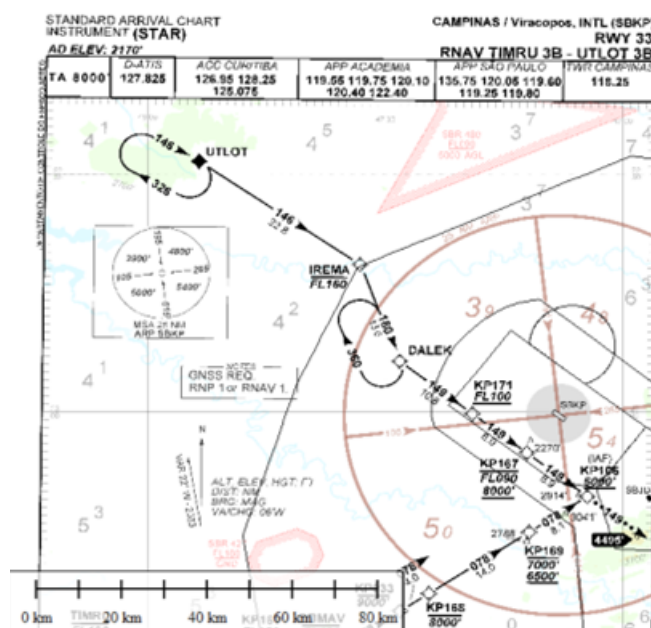


Dentro dessa delimitação, temos os procedimentos Padrões de Chegada Terminal (STAR, no acrônimo em inglês para *Standard Terminal Arrivals*) intitulados de RNAV LOLED 1A (Figura 5), RNAV TIMRU 3B – UTLOT 3B (Figura 6) e RNAV VURAV 2A (Figura 7).

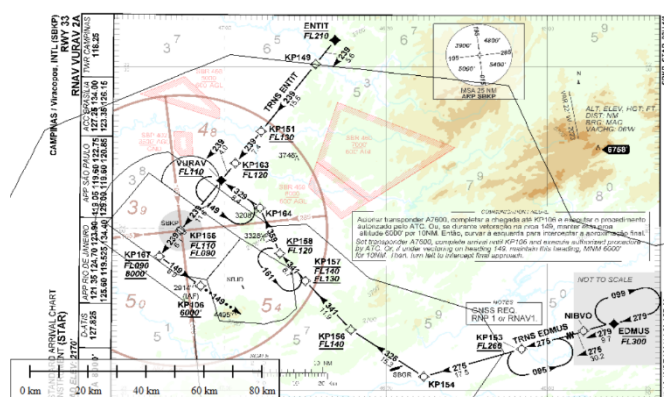
**Figura 5** - Procedimentos STAR RNAV LOLED 1A.



**Figura 6** - Procedimento STAR RNAV TIMRU 3B – UTLOT 3B.



**Figura 7** - Procedimento STAR RNAV VURAV 2A.



A partir da análise da base de dados de Planos de Voos Repetitivos do DECEA e do banco de dados de voos do FlightRadar24™, foram segregados os mesmos números de voos e respectivas rotas iguais para que houvesse um comparativo. Foram 44 voos analisados (AD4025, AD4276, AD4385, AD4942, AD4326, AD2942, AD2874, AD4047, AD4099, AD4708, AD4242, AD4386, AD2954, AD4027, AD4638, AD4310, AD4871, AD4555, AD2030, AD4805, AD2953, AD2021, G31771, AD4449, AD4033, G31712, AD4885, AD4285, AD4341, AD4361, AD4853, AD4872, AD4451, AD2740, AD4356, AD4789, AD4424, AD2697, AD4034, AD2824, AD4340, AD2736, AD4763, AD4322). Destes, nenhum voo atrasou no dia 15/09 e 6

voos atrasaram no dia 22/09, e nenhum voo foi desviado para outro aeroporto.

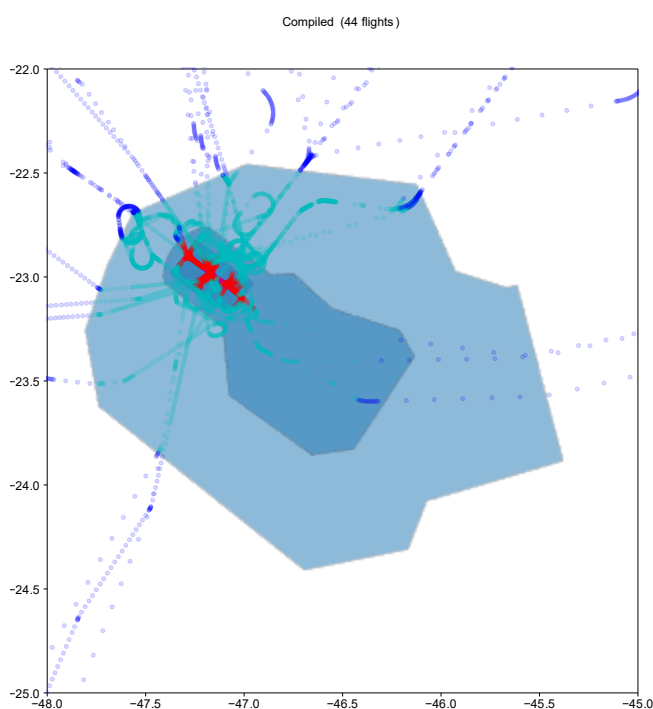
### 4.3 Resultado da aplicação

A Figura 8 mostra a rota dos voos com os atrasos. Nela é possível observar os procedimentos de órbita que geraram o atraso. O tempo para cada procedimento de órbita depende da performance da aeronave, porém cada perna do procedimento leva em torno de 1 minuto, devendo considerar o tempo para a aeronave entrar no procedimento e outros desvios. Quanto mais escura a cor da rota, maior foi o tempo das aeronaves nesse caminho.

A figura mostra que, na área da TMA São Paulo 1, áreas mais congestionadas estão nos limites do terminal, principalmente no procedimento de órbita no fixo DALEK (vide Figura 6) com 00:30:53 h e 13 aeronaves, e na órbita do fixo KP151 (vide Fig. 2) com 00:12:52 h e 3 aeronaves.

A Tabela 4 mostra o total de horas de voo por dia, dentro de cada espaço aéreo, e a soma total da hora de voo. A diferença entre as rotas entre o dia em que não houve atraso e o dia que teve foi de 00:52:29 a mais de voo.

**Figura 8** - Compilado dos voos do dia 22/09.



**Tabela 4 -** Tempo de voo dentro de cada seção do espaço aéreo

| <i>Outputs</i>                      | <b>Tempo (hr)<br/>dia 15/09</b> | <b>Tempo (hr)<br/>dia 22/09</b> |
|-------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| <i>inside_tma_sao_paulo_1</i>       | 06:49:21                        | 07:05:35                        |
| <i>inside_tma_sao_paulo_1_error</i> | 00:25:39                        | 00:29:38                        |
| <i>inside_tma_sao_paulo_2</i>       | 00:55:01                        | 01:13:34                        |
| <i>inside_tma_sao_paulo_2_error</i> | 00:00:11                        | 00:00:14                        |
| <i>inside_ctr_campinas</i>          | 00:43:13                        | 01:07:01                        |
| <i>inside_ctr_campinas_error</i>    | 00:13:04                        | 00:15:24                        |
| <i>total_time_inside_air_space</i>  | 07:48:41                        | 08:41:10                        |

#### 4.4 Resultado da emissão de poluentes

Segundo o manual da OACI [38], os voos dentro do continente sul-americano, são considerados com 82,6% e 77,27%. Nas rotas verificadas, as aeronaves utilizadas são os modelos A76, A32N, 73G e E95, para o A76 se considera a ocupação de 53 passageiros, e, para as demais aeronaves, são considerados 87 passageiros. O total de combustível gasto em cada trecho de voo foi obtido por meio do banco de dados da Anac.

A Tabela 5 mostra o resultado no qual os atrasos identificados na amostra geraram o consumo de 9.278,74 kg/CO<sub>2</sub> a mais emitidos na atmosfera e com um custo de R\$ 3.559,47 a mais na cotação utilizada de toneladas de CO<sub>2</sub>.

**Tabela 5 -** Total de emissão em kg/CO<sub>2</sub> e custo

| <i>Outputs</i>                              | <b>dia 15/09</b> | <b>dia 22/09</b> |
|---------------------------------------------|------------------|------------------|
| <i>total_aircraft_fuel_inside_air_space</i> | 44.587,86 kg     | 49.637,34 kg     |

| <i>Outputs</i>                              | <b>dia 15/09</b>             | <b>dia 22/09</b>             |
|---------------------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| <i>total_passenger_CO2_inside_air_space</i> | 81.933,04 kg/CO <sub>2</sub> | 91.211,78 kg/CO <sub>2</sub> |
| <i>total_cost_CO2</i>                       | R\$ 31.430,80                | R\$ 34.990,27                |

## 5. Considerações finais

A análise bibliométrica por ocorrência nos mostra a relevância do tema desta pesquisa, no qual as palavras-chaves relacionadas com eventos meteorológicos severos, resiliência do transporte aéreo e emissão de gases poluentes aparecem em publicações mais recentes.

Com base nos dados apresentados na Tabela 4, pode-se concluir que houve um aumento no tempo total de voo dentro do espaço aéreo interno da TMA São Paulo 1 e da TMA São Paulo 2, bem como do espaço aéreo interno do controle de tráfego de Campinas, entre os dias 15/09 e 22/09. Além disso, os valores apresentados para os erros nas diferentes áreas de controle também aumentaram em relação ao mesmo período. Em particular, o tempo total de voo dentro da TMA São Paulo 1 aumentou de 06:49:21 no dia 15/09 para 07:05:35 no dia 22/09, enquanto o tempo total de voo dentro da TMA São Paulo 2 aumentou de 00:55:01 para 01:13:34 no mesmo período. Da mesma forma, o tempo total de voo dentro do controle de tráfego de Campinas aumentou de 00:43:13 para 01:07:01. Com base nesses resultados, é possível identificar áreas que requerem atenção para garantir a segurança e a eficiência do tráfego aéreo na região.

A aplicação de um sistema de previsão e análise do tempo de congestionamento do espaço aéreo também contribuiria com medidas ATFM tomadas com informações obtidas por meio do Severe Weather Avoidance Plan (SWAP), cuja ativação já visa à mitigação da interrupção do tráfego aéreo a partir da análise das condições meteorológicas.

Os resultados mostram a diferença de consumo entre as mesmas rotas sem o atraso de voo e um dia de operação com alguns voos atrasados. Essa diferença resultou num consumo de aproximadamente



5 toneladas a mais de combustível ou aproximadamente 11 toneladas a mais de kg/CO<sub>2</sub> emitidos na atmosfera. Mostrando a importância no investimento em infraestrutura, tecnologias e treinamento de pilotos para que as aeronaves possam operar com visibilidade cada vez mais restrita e sem causar prejuízos à segurança operacional de voo.

Não foi considerado neste modelo o impacto do tempo de permanência das aeronaves para cada cabineira; essa análise seria interessante para próximas pesquisas sobre este tema. Outro método seria o uso da metodologia Corsia, que utiliza a potência dos motores durante os ciclos de pouso e decolagem, no qual o regime de potência da aeronave é diferente.

## Referências

- [1] SCARPE, R. A.; L. C. Pelecioni. A data analytics approach for anticipating congested days at the São Paulo International Airport. *Journal of Air Transport Management*, v. 72, 2018, p. 1-10.
- [2] MARQUES, F. B.; Y.; MACULAN, C. M. S. Co-ocorrência de palavras-chave em dados abertos da Capes: teses e dissertações em Ciência da Informação. *Múltiplos Olhares em Ciência da Informação*, [S. l.], n. Especial, 2021. @the
- [3] SANTA, S. L. B.; RIBEIRO, J. M. P.; MAZON, G.; SCHNEIDER, J.; BARCECELOS, R. L.; GUERRA, J. B. S. O. A Green Airport model: Proposition based on social and environmental management systems, *Sustainable Cities and Society*, v. 59, 2020.
- [4] POSTORINO, M. N.; MABTECCHINI, L.; MALANDRI, C.; PAGANELLI, F. A methodological framework to evaluate the impact of disruptions on airport turnaround operations: A case study, *Case Studies on Transport Policy*, v. 8, Issue 2, 2020.
- [5] OUM, T. H.; ZHANG, A.; ZHANG, Y. A note on optimal airport pricing in a hub- and-spoke system, *Transportation Research Part B: Methodological*, v. 30, Issue 1, 1996.
- [6] SIVAKUMAR, S. A novel Integrated Risk Management Method for Airport operations, *Journal of Air Transport Management*, v. 105, 2022.
- [7] LARRAONDO, P. R.; INZA, I.; LOZANO J. A. A system for airport weather forecasting based on circular regression trees, *Environmental Modelling & Software*, v. 100, 2018.
- [8] CHEN, Z.; LI, H.; REN, H.; XU, Q.; HONG, J. A total environmental risk assessment model for international hub airports, *International Journal of Project Management*, v. 29, Issue 7, 2011.
- [9] LIN, M. H. Airport pricing and capacity: Schedule versus congestion delays, *Research in Transportation Economics*, v. 90, 2021.
- [10] PEJOVIC, T.; NOLAND, R. B.; WILLIAMS, V.; TOUMI, R. A tentative analysis of the impacts of an airport closure, *Journal of Air Transport Management*, v. 15, Issue 5, 2009.
- [11] OLIVEIRA, M.; EUFRÁSIO, A. B. R.; GUTERRES, M. X.; MURÇA, M. C. R.; GOMES, R. A. Analysis of airport weather impact on on-time performance of arrival flights for the Brazilian domestic air transportation system, *Journal of Air Transport Management*, v. 91, 2021.
- [12] TOKUSLU, A. Estimation of aircraft emissions at Georgian international airport, *Energy*, v. 206, 2020.
- [13] LIN, M. H.; ZANG, A. Hub congestion pricing: Discriminatory passenger charges, *Economics of Transportation*, v. 5, 2016.
- [14] ZHOU, L.; CHEN, Z. Measuring the performance of airport resilience to severe weather events, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 83, 2020.
- [15] PLANDA, B.; SKORUPSKI, J. Methods of air traffic management in the airport area including the environmental factor, *International Journal of Sustainable Transportation*, v. 11, Issue 4, 2017.
- [16] CARVALHO, L.; STERNBERG, A.; GONÇALVES, L. M.; CRUZ, A. B.; SOARES, J. A.; BRANDÃO, D.; CARVALHO, D.; OGASAWARA, E. On the relevance of data science for flight delay research: a systematic review, *Transport Reviews*, v. 41, Issue 4, 2021.
- [17] WANG, Y.; ZHANG, Y. Prediction of runway configurations and airport acceptance rates for multi-airport system using gridded weather forecast, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, v. 125, 2021.
- [18] SCHULTZ, M.; REITMANN, S.; ALAM, S. Predictive classification and understanding of weather impact on airport performance through machine learning, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, v. 131, 2021.
- [19] ASHLEY, K.; SAVAGE, I. Pricing congestion for arriving flights at Chicago O'Hare Airport, *Journal of Air Transport Management*, v. 16, Issue 1, 2010.

- [20] RHODES, S. L. The effect of the environment on aviation weather safety: Meteorological assessment for the new Denver airport,
- [21] Environmental Impact Assessment Review, v. 13, Issue 1, 1993.
- [22] GONG, S. X. H.; CULLINANE, K.; FIRTH, M. The impact of airport and seaport privatization on efficiency and performance: A review of the international evidence and implications for developing countries, *Transport Policy*, v. 24, 2012.
- [23] LUI, G. N.; HON, K. K.; LIEM, R. P. Weather impact quantification on airport arrival on-time performance through a Bayesian statistics modeling approach, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, v. 143, 2022.
- [24] JOHNSON, T.; SAVAGE, I.; Departure delays, the pricing of congestion, and expansion proposals at Chicago O'Hare Airport, *Journal of Air Transport Management*, v. 12, Issue 4, 2006.
- [25] BURBIDGE, R. Adapting aviation to a changing climate: Key priorities for action, *Journal of Air Transport Management*, v. 71, 2018.
- [26] WANG, S.; CHU, J.; LI, J.; DUAN, R. Prediction of Arrival Flight Operation Strategies under Convective Weather Based on Trajectory Clustering, *Aerospace*, v. 9, Issue 4, 2022.
- [27] KETABDARI, M.; TORALDO, E.; CRISPINO, M. Numerical Risk Analyses of the Impact of Meteorological Conditions on Probability of Airport Runway Excursion Accidents. *Computational Science and Its Applications – ICCSA 2020. ICCSA 2020. Lecture Notes in Computer Science*, v. 12249. Springer, Cham, 2020.
- [28] TASZAREK, M.; KENDZIERSKI, S.; PILGUJ, N. Hazardous weather affecting European airports: Climatological estimates of situations with limited visibility, thunderstorm, low-level wind shear and snowfall from ERA5. *Weather and Climate Extremes*, v. 28, 2020.
- [29] KAEWUNRUEN, S.; SRESAKOOLCHAI, J.; XIANG, Y. Identification of Weather Influences on Flight Punctuality Using Machine Learning Approach. *Climate*, v. 9, Issue 127, 2021.
- [30] ADLER, N.; YAZHEMSKY, E. The value of a marginal change in capacity at congested airports, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, v. 114, Part A, 2018.
- [31] DECEA – Departamento de Controle do Espaço Aéreo. ICA 100-12 – Regras do Ar. Ministério da Defesa, Brasília, 2016.
- [32] DECEA – Departamento de Controle do Espaço Aéreo. ROCA 21-74 – Regulamento do Centro de Gerenciamento da Navegação Aérea. Ministério da Defesa, Brasília, 2018.
- [33] DECEA – Departamento de Controle do Espaço Aéreo. API-REDEMETS: O que é? online, s.d. Disponível em: <<https://ajuda.decea.mil.br/base-de-conhecimento/api-redemets-o-que-e/>>.
- [34] DECEA – Departamento de Controle do Espaço Aéreo. ICA 105-16 – Códigos Meteorológicos. Ministério da Defesa, Brasília, 2017.
- [35] IATA – International Air Transport Association (IATA). Air Passenger Numbers to Recover in 2024. ONLINE, 2022. Available at: <<https://www.iata.org/en/pressroom/2022-releases/2022-03-01-01/>>.
- [36] ANAC – Agência Nacional de Aviação Civil. Percentuais de atrasos e cancelamentos. online, s.d. Disponível em: <<https://www.anac.gov.br/acesso-a-informacao/dados-abertos/areas-de-atuacao/voos-e-operacoes-aereas/percentuais-de-atrasos-e-cancelamentos>>.
- [37] DECEA – Departamento de Controle do Espaço Aéreo. Anuário Estatístico de Tráfego Aéreo 2021. ONLINE, 2022. Disponível em: <[http://portal.cgna.decea.mil.br/files/uploads/anuario\\_estatistico/anuario\\_estatistico\\_2021.pdf](http://portal.cgna.decea.mil.br/files/uploads/anuario_estatistico/anuario_estatistico_2021.pdf)>.
- [38] CAMPOS, V. B. G. Planejamento de Transportes: Conceitos e Modelos, Ed. Interciência, 2013.
- [39] INVESTING.com. Crédito Carbono Futuros – Dez 22 (CFI2Z2). ONLINE. Disponível em: <<https://br.investing.com/commodities/carbon-emissions>>.
- [40] PRAZERES, D. L.; GUEDES, E. P. A Participação da Administração Privada na Exploração da Infraestrutura Aeroportuária Brasileira. Caderno do IX Simpósio de Transporte Aéreo – SITRAER. Manuais, 2010 p. 386-397, Tr. 41.
- [41] CORRADO, S. J.; PURANIK, T. G.; FISCHER, O. P.; MAVRIS, D. N. A clustering-based quantitative analysis of the interdependent relationship between spatial and energy anomalies in ADS-B trajectory data,
- [42] *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, v. 131, 2021.
- [43] SILVA, L. C.; MURÇA, M. C. R. A data analytics framework for anomaly detection in flight operations, *Journal of Air Transport Management*, v. 110, 2023.
- [44] DECEA – Departamento de Controle do Espaço Aéreo. CIRCEA 100-77 – Padronização na Utilização do TATIC e SAGIATIO Integrados no Âmbito do SISCEAB. Ministério da Defesa, Brasília, 2017.
- [45] DECEA – Departamento de Controle do Espaço Aéreo. AIC A 20/19 - Severe Weather Avoidance Plan (SWAP). Ministério da Defesa, Brasília, 2019.

# Síntese e caracterização de nanopartículas de $\text{CsFeO}_2$ utilizando o método sol-gel/combustão

Camila Oliveira Baptista<sup>1\*</sup>, Bruno Cardoso<sup>1</sup>, Danúbia de Carvalho<sup>1</sup>, Claudio de Oliveira<sup>1</sup>, Ronaldo de Biasi<sup>1</sup>, André Ben-Hur Figueiredo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Militar de Engenharia, Seção de Engenharia de Materiais

Praça General Tibúrcio, 80, 22290-270

Praia Vermelha, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

\*camilabaptista@ime.cb.br

**RESUMO:** As nanopartículas magnéticas possuem diversas aplicações de grande importância nas áreas tecnológica, ambiental e médica devido a propriedades especiais como o superparamagnetismo. O principal objetivo desta pesquisa consiste na obtenção de uma ferrita magnética. Foi utilizado o método de sol-gel/combustão para produzir nanopartículas de ferrita de cério ( $\text{CsFeO}_2$ ). A espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) caracterizou as amostras, permitindo a observação da indicação da fase ferrita nos picos de 343 e 318  $\text{cm}^{-1}$ , bem como das vibrações da ligação Metal-O dos átomos em sítios tetraédricos e octaédricos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Nanopartículas. Superparamagnetismo. Ferrita de cério. Sol-gel/combustão. Espectroscopia infravermelha por transformada de Fourier.

**ABSTRACT:** Magnetic nanoparticles have many important applications in the technological, environmental, and medical fields due to their special properties (such as superparamagnetism). The main objective of this research is to obtain a magnetic ferrite. The sol-gel/combustion method was used to produce nanoparticles of caesium ferrite ( $\text{CsFeO}_2$ ). Fourier transform infrared spectroscopy characterized the samples, indicating a ferrite phase at the peaks at 343 and 318  $\text{cm}^{-1}$  and the Metal-O bond vibrations of the atoms in tetrahedral and octahedral sites.

**KEYWORDS:** Nanoparticles. Superparamagnetism. Cesium ferrite. Sol-gel/combustion. Fourier transform infrared spectroscopy.

## 1. Introdução

Atualmente, com o advento da nanociência e nanotecnologia, as nanopartículas magnéticas têm encontrado inúmeras aplicações nos campos da biomedicina, diagnóstico, biologia molecular, bioquímica, catálise etc. Nanopartículas de óxidos magnéticos são compostos principalmente de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (hematita) [1].

Os nanomateriais são um tópico de pesquisa devido às suas propriedades únicas resultantes do seu pequeno tamanho. Dentre essas propriedades, destacam-se as das nanopartículas de ferrita, que apresentam uma mudança significativa no comportamento magnético à medida que seu tamanho de partícula diminui.

Partículas cerâmicas magnéticas com dimensões nanométricas não possuem o mesmo comportamento de partículas maiores do mesmo material, portanto, uma vez que suas propriedades tenham sido expan-

didas, essas partículas podem ser utilizadas para melhorar materiais ou até mesmo para obter novos materiais. Isso abriu um campo de pesquisa voltado para o entendimento das propriedades de nanopartículas magnéticas, especialmente nanopartículas de um grupo de óxidos metálicos chamados ferritas.

Os primeiros produtos comerciais de ferritas foram desenvolvidos a partir de 1945 por Kato e Takeshi [2], desde então, o enfoque do desenvolvimento desse material tem sido para a fabricação de componentes menores e de grande confiabilidade [3].

O cério é o elemento químico menos eletronegativo e só tem um isótopo estável, o qual foi utilizado para a obtenção da ferrita de cério ( $\text{CsFeO}_2$ ).

Várias técnicas de preparação, como combustão, sol-gel/combustão e coprecipitação, podem ser usadas para preparar nanopartículas de ferrita [4,5,6].

O principal objetivo deste trabalho consiste na obtenção de uma ferrita magnética. As nanopartículas

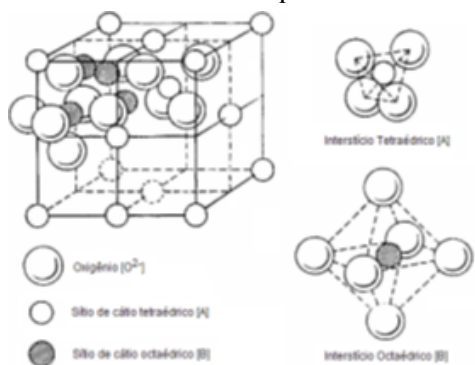
de  $\text{CsFeO}_2$  foram sintetizadas pelo método de sol-gel/combustão e caracterizadas por espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), que é uma técnica instrumental rápida e pode evidenciar a presença de vários grupos funcionais em compostos.

## 1.1 Fundamentação Teórica

Para compreender as propriedades da ferrita, é necessário analisar a estrutura cristalina desses materiais. Os óxidos metálicos têm a estrutura do mineral Espinélio ( $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ ), no qual os íons  $\text{O}^{2-}$  com raio atômico de 0,13 nm formam uma rede cúbica de face centrada. Os íons de menor raio atômico ocupam sítios tetraédricos ( $\text{Mg}^{2+}$ ) chamados sítios [A] e sítios octaédricos [ $\text{Al}^{3+}$ ], chamados sítios [B] [7].

A ferrita tem uma estrutura cristalina do tipo espinélio, mostrada na Figura 1, representada pela fórmula química  $\text{M}^{2+}\text{Fe}_2^{3+}\text{O}_4^{2-}$ , em que M são metais divalentes, como  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Co}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ , e a ocupação dos sítios tetraédricos e octaédricos pelos íons divalentes influencia as propriedades magnéticas desses materiais [8].

**Figura 1** - Estrutura do Espinélio.



**Fonte:** [6]

Como nem todos os sítios disponíveis são ocupados, existem três configurações diferentes que a estrutura pode assumir, são elas: espinélio normal, espinélio parcialmente invertido e espinélio invertido. O espinélio normal é definido como a configuração em que apenas os íons metálicos divalentes ( $\text{M}^{2+}$ ) ocupam os sítios [A] e os íons  $\text{Fe}^{3+}$  ocupam os sítios [B]. Na configuração com  $\text{M}^{2+}$  e  $\text{Fe}^{3+}$  nos sítios [A] e [B], com a proporção variando de 0 a 1, o espinélio é classificado como parcialmente

invertido. Na configuração em que os íons  $\text{Fe}^{3+}$  ocupam o sítio [A] e metade do sítio [B], enquanto os íons  $\text{M}^{2+}$  ocupam a outra metade do sítio [B], o espinélio é denominado invertido [7]. A ocupação dos sítios afeta o comportamento magnético do material.

Esse comportamento é influenciado não apenas pela estrutura cristalina, mas também pela estrutura macroscópica. Um dos fenômenos efetivamente notados em nanopartículas é o superparamagnetismo, materiais que apresentam essa propriedade não retêm memória magnética, ou seja, ao serem retirados da influência de um campo magnético não há magnetização remanescente, para temperaturas acima da temperatura de bloqueio.

## 2. Desenvolvimento

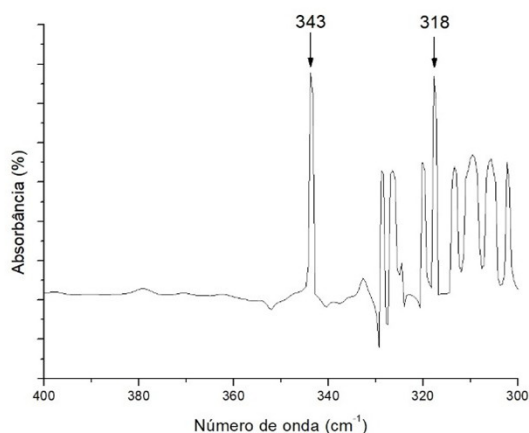
A síntese pelo método sol-gel/combustão [8] para preparação do pó de  $\text{CsFeO}_2$  envolveu as seguintes etapas:

1. São preparadas soluções em água destilada dos precursores químicos  $\text{Cs}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  e  $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  em concentrações apropriadas;
2. É preparada uma solução de ácido cítrico ( $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) em água destilada na concentração molar de 0,75 M;
3. As soluções dos itens 1 e 2 são combinadas para se obter uma solução homogênea;
4. A solução obtida no item 3 é colocada sobre uma placa quente a 60 °C e submetida a agitação contínua durante aproximadamente 4 horas, para a formação de um gel;
5. O gel é aquecido a 80 °C e mantido sob agitação até se tornar transparente;
6. A temperatura do gel transparente é aumentada para 200 °C, fazendo com que, durante cerca de 20 minutos, ocorra um processo de autocombustão da amostra;
7. O material obtido no item 6 é dividido em vários lotes que são submetidos a tratamentos térmicos a 700 °C durante 30 minutos, 1 e 2 horas.

Os espectros vibracionais de infravermelho foram obtidos em um espectrofotômetro Nicolet iS10 por refletância total atenuada (ATR-FTIR), com KBr como agente dispersante, na faixa de 400 a 300  $\text{cm}^{-1}$ , resolução de 4  $\text{cm}^{-1}$ , 32 scans, disponível no IPqM.

### 3. Resultados

**Figura 2** - Espectro FTIR da ferrita de cério após tratamento térmico de 1 hora.



**Fonte:** [Elaboração própria].

No espectro vibracional de infravermelho da amostra de  $\text{CsFeO}_2$ , mostrado na Figura 2, observa-se

indicação da fase ferrita nos picos de 343 e 318  $\text{cm}^{-1}$ , assim como as vibrações da ligação Metal-O, dos átomos em sítios tetraédricos e octaédricos [9,10].

### 4. Conclusão

O resultado deste trabalho mostra que o método de sol-gel/combustão é promissor para a obtenção da ferrita de cério, na forma de pó nanométrico. O espectro obtido por caracterização de FTIR demonstra o sucesso na síntese com a observação de picos característicos de fase ferrita e de estruturas tipo espinélio.

Face ao resultado acima, o objetivo deste trabalho foi alcançado, em que foi obtida uma ferrita magnética.

### Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPERJ, à CAPES e ao CNPQ pelo apoio financeiro.

### Referências

- [1] MATERÓN, E. M.; MIYAZAKI, C. M.; CARR, O.; JOSHI, N.; PICCIANI, P. H. S.; DALMASCHIO, C. J.; DAVIS, F.; SHIMIZU, F. M. Magnetic nanoparticles in biomedical applications: A review. *Applied Surface Science Advances*, [s. l.], v. 6, p. 100-163, 2021. DOI: 10.1016/j.apsadv.2021.100163.
- [2] KATO, Y.; TAKESI, T. Japan Patent, 98844, 1932. In: OHIAI, T. Current Status of Soft Ferrite in Japan. *Journal Physical IV*, France, v. 7, n. C1, p. C1-27-C1-30, 1997.
- [3] GAMA, A. M.; LANGDRAF, F. J. G.; GOUVÊA, D.; RODRIGUES, D.; JANASI, S. R. Efeito das condições de sinterização na microestrutura e nas propriedades magnéticas das ferritas Mn-Zn. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM- INTERNACIONAL, 57, 2002, São Paulo. *Anais*. São Paulo: ABM, 2002. p. 832-841.
- [4] MONTEIRO, E. S. *Nanopartículas de ni-zn utilizadas como absorvedoras de micro-ondas*. 2016. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2016.
- [5] CARP, O.; PATRON, L.; RELLER, A. Coordination compounds containing urea as precursors for oxides – a new route of obtaining nanosized  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$ . *Materials Chemistry and Physics*, [s. l.], v. 101, n. 1, p. 142-147, 2007.
- [6] ZHANG, S.; DONG, D.; SUI, Y.; LIU, Z.; WANG, H.; QIAN, Z.; SU, W. Preparation of core shell particles consisting of cobalt ferrite and silica by sol-gel process. *Journal of Alloys and Compounds*, [s. l.], v. 415, n. 1-2, p. 257-260, 2006.
- [7] CULLITY, B. D.; GRAHAM, C. D. *Introduction to Magnetic Materials*. 2. ed. New Jersey: Wiley, 2009.
- [8] HUANG, Y.; TANG, Y.; WANG, J.; CHEN, Q. Synthesis of  $\text{MgFe}_2\text{O}_4$  nanocrystallites under mild conditions. *Materials Chemistry and Physics*, [s. l.], v. 97, n. 2-3, p. 394-397, 2006. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2005.08.035.
- [9] RAJASHEKHAR, K.; VINOD, G.; KUMAR, K. M.; NAIK, J. L. Impact of erbium (Er) doping on the structural and magnetic properties of Ni-Cu ( $\text{Ni}_{0.1}\text{Cu}_{0.9}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ) nanoferrites. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, [s. l.], v. 555, p. 169-323, 2022. DOI: 10.1016/j.jmmm.2022.169323.
- [10] MOUHIB, Y.; BELAICHE, M.; ELANSARY, M.; FERDI, C. A. Effect of heating temperature on structural and magnetic properties of zinc ferrite nanoparticles synthesized for the first time in presence of Moroccan reagents. *Journal of Alloys and Compounds*, [s. l.], v. 895, p. 162-634, 2022.



# Avanços da detecção de sinais de tiros baseada em sensores acústicos

José Antonio Apolinário Junior<sup>1</sup>, apolin@ime.eb.br, Orcid 0000-0003-1426-9636

Lucas Rafael de Aguiar Silva<sup>1</sup>, lucas.silva@ime.eb.br, Orcid 0009-0007-8139-4644

<sup>1</sup> Instituto Militar de Engenharia (IME) – SE/3

**RESUMO:** A detecção de sinais acústicos impulsivos e sua classificação como disparos de arma de fogo desempenham um papel crucial em sistemas destinados a localizar a origem de tiros por caçadores ou atiradores em geral. Com aplicações de relevância no contexto militar, os sistemas de detecção de tiros enfrentam desafios substanciais relacionados ao seu uso em ambientes operacionais, que frequentemente envolvem propagação multipercursos e ruído ambiental. Além disso, esses sistemas precisam ser capazes de operar em tempo real. Este artigo aborda métodos modernos para a detecção e classificação das componentes acústicas dos sinais de tiro, propondo modificações visando aprimorar seus desempenhos e avaliando-os com uma diversificada base de sinais de tiros reais. Os resultados obtidos são comparados para determinar o método que se mostra mais adequado para uma implementação em hardware. O texto fornece insights valiosos para o desenvolvimento de sistemas de detecção de tiros em ambientes desafiadores.

**PALAVRAS-CHAVE:** Sinais de Tiro. Caçador. Detecção. Classificação. Direção de Chegada.

**ABSTRACT:** The detection of impulsive acoustic signals and their classification as gunshots plays a crucial role in systems designed to pinpoint the origin of gunshots fired by snipers or regular shooters. With significant applications in the military context, gunshot detection systems face substantial challenges related to their use in operational environments, which often involve multipath propagation and environmental noise. Moreover, these systems need to be capable of real-time operation. This article addresses modern methods for detecting and classifying the acoustic components of gunshot signals, proposing modifications to enhance their performance and evaluating them using a diverse dataset of real-life gunshot signals. The results are compared to determine the most suitable method for hardware implementation. The text provides valuable insights for developing gunshot detection systems in challenging environments.

**KEYWORDS:** Gunshot Signals. Sniper. Detection. Classification. Direction of Arrival.

## 1. INTRODUÇÃO

Os conflitos contemporâneos estão intrinsecamente relacionados à aplicação de tecnologia no campo de batalha. A Guerra da Ucrânia, por exemplo, evidencia aplicações militares que englobam mísseis, drones, radares e guerra cibernética [1]. Mesmo assim, recursos militares convencionais persistem de maneira onipresente e letal nas fileiras das forças de segurança. Este trabalho destaca uma ameaça notoriamente silenciosa: os caçadores, conhecidos como *snipers* no vernáculo inglês [2].

Os caçadores, também denominados atiradores de elite ou franco-atiradores, têm a missão de penetrar nas defesas inimigas, utilizando técnicas refinadas de camuflagem, e eliminar alvos estratégicos, causando, assim, confusão nas tropas inimigas [2]. A atuação dos caçadores tem uma aura mística, sendo ressaltada na mídia, como nos filmes *Círculo de Fogo* (de 2001, que narra a história de um soldado soviético chamado

Vasily Zaitsev na Batalha de Stalingrado) [3] e *Sniper Americano* (de 2014, baseado na autobiografia de Chris Kyle, um caçador americano que obteve feitos notórios na Guerra do Iraque) [4]. Outros exemplos notáveis de atiradores de elite incluem o finlandês Simon Häyhä (conhecido como “Morte Branca”) e Lyudmila Pavlichenko (conhecida como “Senhora Morte”), nascida na Província de Kiev (então Império Russo) [5].

As principais táticas contra a ação de franco-atiradores consistem em deslocar a tropa para fora do ângulo de visada do inimigo e alvejá-lo com disparos, a fim de forçá-lo a mudar de posição [2]. No entanto, essas duas ações demandam o conhecimento da direção de onde provém o disparo [6]. Nesse contexto, destaca-se a pesquisa desenvolvida há mais de uma década no Laboratório de Processamento Digital de Sinais (LPDS) do Instituto Militar de Engenharia (IME) [7-13], que visa aprimorar os algoritmos de estimação da direção na qual o atirador inimigo se encontra (DOA, do inglês

*Direction of Arrival*). Isso é realizado por meio do processamento dos componentes acústicos de um sinal de tiro: a onda de choque (SW, do inglês *Shock Wave*), no caso de um projétil supersônico, e a explosão da carga propelente do projétil (MB, do inglês *Muzzle Blast*).

Soluções comerciais que fornecem essa direção já existem e são aplicadas por exércitos ao redor do mundo. Temos como exemplos os sistemas *Boomerang III*, de origem americana (Raytheon), *TRV-SD 500*, de origem turca (Transvaro) e *Pilar V*, de origem francesa (Metravib Defence) [14-16].

A estimação da direção na qual o caçador realizou um disparo requer uma prévia detecção do tiro, compreendendo duas etapas: a detecção de sinais impulsivos e a classificação em SW ou MB, quando for o caso [6]. Este trabalho objetiva avaliar o desempenho de algoritmos de detecção de sinais de tiros, propor adaptações que visem melhorar seus resultados e indicar a melhor opção para aplicações práticas. Foram analisados quatro métodos neste artigo: o método da correlação cruzada proposto em [7], o método da análise espectral da energia proposto em [17], o método da SNR (Razão Sinal-Ruído, do inglês *Signal to Noise Ratio*) apresentado em [18] e o método utilizando Redes Neurais proposto em [19].

Uma vez detectado um sinal impulsivo, é necessário determinar se ele é oriundo de um sinal de tiro (classificá-lo como SW ou MB) ou não. As SW são ondas acústicas geradas pelo efeito Mach, formadas na trajetória dos projéteis supersônicos lançados, por exemplo, por um fuzil [20]. Por outro lado, o MB corresponde à onda acústica formada pela diferença de pressão entre o meio exterior ao armamento e o gás interior ao armamento aquecido pelo acionamento da carga do projétil [20]. Uma informação relevante sobre o SW é que ele tem um formato em “N” e uma duração entre 0,3 e 0,5 ms, enquanto o MB tem duração entre 3 e 5 ms [20].

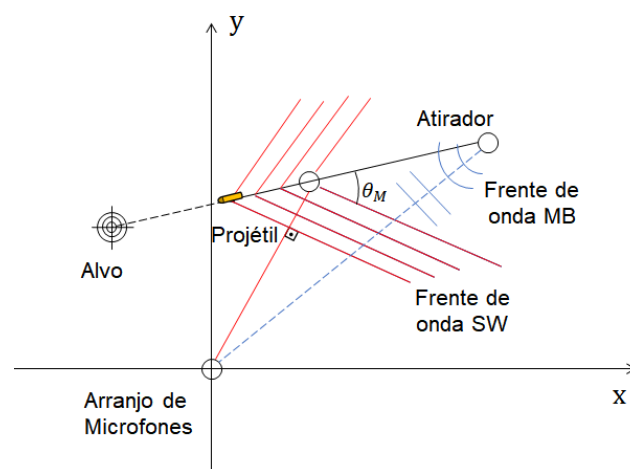
## 2. CONCEITOS FUNDAMENTAIS

### 2.1 Geometria do problema

A geometria típica da detecção do disparo de um caçador é composta por três elementos: atirador, alvo

e arranjo de microfones. Um arranjo de microfones é utilizado para permitir a estimação da direção de chegada. A Figura 1 apresenta a disposição desses elementos, além de indicar as frentes de onda de SW e de MB geradas pelo disparo.

**Figura 1** - Geometria típica do problema de detecção de um projétil supersônico.



É importante destacar que, havendo um tiro, a configuração típica pode não se passar como indicado na Figura 1, não somente pela ausência da SW, mas também pela ausência da MB. Essas situações ocorrem quando objetos ou barreiras impedem que as ondas acústicas atinjam o arranjo de microfones [6]. No caso da componente SW, ela também pode estar ausente se os microfones estiverem posicionados atrás do atirador e, portanto, fora do campo de visão da onda de choque.

### 2.2 Detecção de sinal impulsivo

A primeira etapa do processamento abordado neste trabalho consiste em verificar se a janela de tempo do sinal acústico em análise corresponde a um sinal impulsivo. A detecção envolve a averiguação de se um parâmetro específico, obtido pela aplicação de um algoritmo (por exemplo, o pico de correlação cruzada da janela do sinal adquirido com um modelo conhecido de SW), excede um determinado limiar. O treinamento é conduzido pela variação do limiar

em uma faixa de valores, formando, assim, uma curva denominada ROC (acrônimo de *Receiver Operation Characteristic*) [21].

A curva ROC é construída a partir das medidas de desempenho denominadas Taxa de Verdadeiros Positivos (TPR, de *True Positive Rate*) e Taxa de Falsos Verdadeiros (FPR, de *False Positive Rate*). Os conceitos de TPR e FPR, expressos respectivamente pelas Equações (1) e (2) [21], são mais bem compreendidos no contexto de uma matriz de confusão, exemplificada na Tabela 1.

$$TPR = \frac{TP}{TP + FN} \quad (1)$$

$$FPR = \frac{FP}{FP + TN} \quad (2)$$

Na curva ROC, o sistema de eixos FPR  $\times$  TPR tem a particularidade de que quanto mais a curva se aproxima do ponto (FPR, TPR) = (0,1), melhor é o desempenho do detector. Como, na prática, esse ponto geralmente não é atingido, o ponto de operação é escolhido com base em critérios operacionais.

**Tabela 1** - Matriz de confusão

|                    |          | Condição Verdade |         |
|--------------------|----------|------------------|---------|
|                    |          | Presente         | Ausente |
| Resultado do Teste | Positivo | TP               | FP      |
|                    | Negativo | FN               | TN      |

## 2.3 Classificação de sinais de tiro

A classificação de um sinal designado impulsivo envolve a decisão sobre quais componentes estão presentes em uma dada janela de áudio, sendo elas SW, MB ou NT (janela de não tiro, isto é, apesar do sinal ser impulsivo, a presença de um tiro não é caracterizada). Essa tipificação acontece pela extração de parâmetros do sinal e, em seguida, pela aplicação de um critério de classificação nesses parâmetros. Os quatro parâmetros ou características (*features*, como conhecidas em inglês) empregados neste trabalho foram: o pico de correlação cruzada com um modelo, os coeficientes *Linear Predictive Coding* (LPC), os coeficientes *Mel-Frequency Cepstral Coefficients* (MFCC) e a energia normalizada do sinal [7] [17] [18] [19].

**Tabela 2** - Vetor de características (*features*)

| Parâmetros                                                | Índices |
|-----------------------------------------------------------|---------|
| Correlação Cruzada com Modelo de AGLC SW/MB               | 1 e 2   |
| Correlação Cruzada com Modelo de FAL SW/MB                | 3 e 4   |
| Correlação Cruzada com Modelo de M2 <i>Browning</i> SW/MB | 5 e 6   |
| Correlação Cruzada com Modelo de IA2 SW/MB                | 7 e 8   |
| Coeficientes LPC (20 ao todo)                             | 9 a 28  |
| Coeficientes MFCC (26 ao todo)                            | 29 a 54 |
| Energia Normalizada do Sinal (Z)                          | 55      |

A Tabela 2 indica como os parâmetros empregados para a classificação estão distribuídos. Os armamentos mencionados são detalhados na Seção 3.1. Cada método realiza a extração de um número diferente de parâmetros. O processamento (detecção e classificação) é realizado no software Matlab® pelos aplicativos *Classification Learner* ou *Neural Pattern Recognition*, em que a entrada de ambos é uma matriz contendo os parâmetros de um conjunto de janelas, e a saída é uma função que realiza a classificação.

## 3. METODOLOGIA

A detecção e classificação de sinais impulsivos, como SW ou MB, envolvem diversas etapas iniciais, desde a aquisição dos sinais de áudio até o treinamento de algoritmos responsáveis por atingir automaticamente os objetivos deste trabalho. A seguir, apresentamos os armamentos utilizados, a composição da base de sinais para o treinamento e teste, a preparação da base antes da aplicação dos algoritmos e os métodos analisados, destacando detalhes dos algoritmos originais, assim como as adaptações implementadas.

### 3.1 Base de sinais e armamentos

Os armamentos utilizados pelos caçadores do Exército Brasileiro, que constituíram a base de sinais,

foram o AGLC, o FAL, o IA2 e o M2 *Browning* [22–25], todos com a capacidade de realizar disparos super-

sônicos. Algumas características técnicas de cada um desses armamentos estão apresentadas na Tabela 3.

**Tabela 3** - Características de alguns armamentos empregados por caçadores brasileiros

| Armamento                | AGLC             | IA2     | FAL     | M2 <i>Browning</i> |
|--------------------------|------------------|---------|---------|--------------------|
| Calibre                  | .308" ou 7,62 mm | 7,62 mm | 5,56 mm | .50" ou 12,7mm     |
| Velocidade inicial (m/s) | 820              | 840     | 780     | 930                |
| Alcance (m)              | 800              | 1800    | 300     | 300                |
| Fabricante               | IMBEL            | IMBEL   | IMBEL   | General Dynamics   |

A amostragem do sinal foi realizada por um microfone da marca Behringer, modelo ECM8000 [26], usado nos arranjos previamente empregados para a aquisição de áudio da principal base utilizada neste trabalho.

A frequência de amostragem utilizada no processamento dos sinais de áudio foi de 96 kHz. Os sinais que inicialmente haviam sido adquiridos a 44,1 kHz foram reamostrados no Matlab®.

Os sinais foram coletados em quatro estandes de tiro: Centro de Avaliação do Exército (CAEx) 2011, Centro de Instrução de Operações Especiais (CIOpEsp) 2010, CAEx 2014 e Centro de Instrução Almirante Milcíades Portela Alves (CIAMPA) 2010. A Tabela 4 apresenta a distribuição dos sinais de tiros para o treinamento.

Todos os sinais foram divididos em janelas com duração de 20 ms e uma superposição de 50%, permitindo a obtenção de janelas contendo SW, MB ou ausência de sinal de tiro (NT). A distribuição dessas janelas para o treinamento e teste está indicada na Tabela 5. No treinamento, a separação de um número de janelas de SW, MB e NT foi realizada com o objetivo de evitar viés na classificação, procurando manter quantidades equilibradas. No teste, foram empregados 60 áudios completos das bases de tiro (12 do CAEx 2014, 40 do CAEx 2011, 5 do CIOpEsp 2010, e 9 do CIAMPA 2010), simulando, assim, os grandes intervalos de tempo sem disparo de caçador no campo de batalha. Isso resultou em um número discrepante de janelas de NT em relação às outras classes.

**Tabela 4** - Distribuição de SW e de MB no treinamento para cada base

| Base        | Armamento (distâncias) | Número de Sinais |
|-------------|------------------------|------------------|
| CAEx 2011   | AGLC (300 a 700 m)     | 28 SW e 28 MB    |
|             | FAL (300 a 500 m)      | 20 SW e 20 MB    |
|             | IA2 (300 a 500 m)      | 21 SW e 21 MB    |
|             | .50 BMG (300 a 500 m)  | 16 SW e 15 MB    |
| CIOpEsp     | AGLC (200 m)           | 5 SW e 5 MB      |
|             | PSG1 (200 m)           | 3 SW e 3 MB      |
| CAEx 2014   | AGLC (540 a 1062 m)    | 43 SW e 43 MB    |
| CIAMPA 2010 | FAL (31 a 74 m)        | 23 SW e 10 MB    |

**Tabela 5** - Distribuição das janelas

| Tipo de Janela | Treinamento | Teste |
|----------------|-------------|-------|
| SW             | 159         | 60    |
| MB             | 144         | 60    |
| NT             | 313         | 36476 |

Para avaliar o desempenho do método escolhido mais eficiente, no processamento dos sinais disponíveis no LPDS/IME, em comparação a uma outra base de dados, foram utilizados os sinais de tiros previamente apresentados em outro artigo [27] e disponíveis para download na internet. Nessa segunda base, foram empregados três armamentos distintos: pistolas automáticas calibre .45", .40" e 9 mm; ela possui 12 disparos em 9 posições distintas, totalizando 324 disparos [27]. Os projéteis dessas pistolas não são supersônicos, portanto, o áudio gravado apresenta apenas MB.

### 3.2 Preparação da base

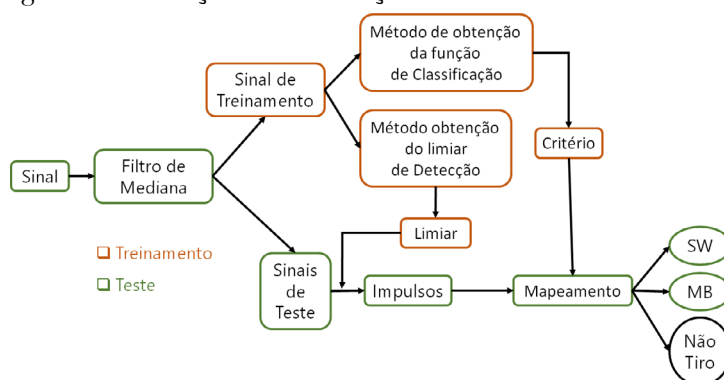
Considerando que a aquisição dos sinais de tiro ocorreu em diferentes ambientes e com distintos

valores de ganhos de microfones, após a remoção do nível DC (quando presente), procedeu-se à normalização da energia de cada sinal. Com o objetivo de reduzir a influência do ruído, especialmente nas componentes MB dos sinais, os quais, devido às maiores distâncias dos atiradores, apresentam as menores SNRs, aplicou-se um filtro de mediana [9] para realçar as porções impulsivas dos sinais de áudio.

### 3.2 Métodos

A seguir, serão detalhados os quatro métodos investigados neste trabalho. O treinamento para cada um desses métodos envolve duas etapas: a obtenção de um limiar de detecção (por exemplo, a partir da construção de uma curva ROC e escolha de um ponto de operação) e a geração de um critério ou função (por exemplo, por um algoritmo de aprendizado de máquina) que realize a classificação das janelas em SW, MB ou NT. Ambas as etapas são indicadas na Figura 2. O teste de cada um dos métodos envolve a utilização de um limiar de detecção e um critério de classificação obtidos no treinamento com sinais de áudio dividido em janelas contendo tiros (SW, MB ou ambos) ou não (somente ruído ambiente).

**Figura 2** - Fluxograma geral da detecção e classificação.



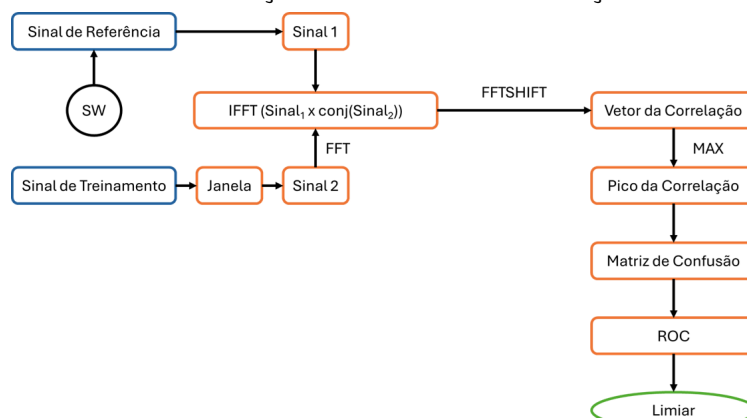
#### 3.2.1 Método da Correlação Cruzada

Na versão original desse método, a detecção é realizada pela aplicação do algoritmo *Generalized Cross Correlation* (GCC) em cada uma das janelas, indicando um sinal impulsivo caso o valor obtido do pico de correlação cruzada seja superior a um limiar. No treinamento da detecção, conforme mostrado na Figura 3, a correla-

ção cruzada de cada uma das janelas do sinal de treinamento com um modelo (sinal de referência) de SW do AGLC é computada; os picos de correlação cruzada são separados e convertidos em uma matriz de confusão. A obtenção de diversas matrizes de confusão mediante a variação do limiar gera uma curva ROC que permite a escolha do ponto de operação. Em nossos experimentos, o ponto de operação escolhido foi  $TPR > 90\%$ .



**Figura 3** - Delimitação do limiar de detecção do Método da Correlação Cruzada.



**Fonte:** [7].

O método proposto em [7], como visto, usa exclusivamente a SW do fuzil AGLC como sinal de referência e não apresenta um algoritmo de separação de SW, MB e NT. Neste trabalho, empregamos as componentes SW e MB dos quatro armamentos indicados na Tabela 3, ou seja, os oito primeiros parâmetros (picos de correlação cruzada) do vetor de características detalhado na Tabela 2. Adicionalmente, a versão modificada desse método utiliza como algoritmo de classificação a função não linear gerada no aplicativo *Classification Learner* do Matlab® utilizando o algoritmo de *Support Vector Machine Kernel* (SVM Kernel).

### 3.2.2 Análise espectral da energia

A obtenção do limiar de detecção deste método envolve a computação da energia  $E_{Jan}$  obtida da Transformada de Fourier a Tempo Curto (STFT ou *Short Time Fourier Transform*) do sinal  $x(n)$  janelado, ou seja,  $X(k)$  que corresponde à DFT do produto  $x(n)$  por uma janela  $w(n)$ , em que “ $n$ ” é o tempo discreto e “ $k$ ” é o índice (*bin* de frequência) da DFT. De  $E_{Jan}$ , obtém-se a função de detecção de sinal impulsivo de cada janela  $D_{Jan}$ , conforme Equações (3) e (4) [17]. Se  $D_{Jan}$  for maior do que um limiar, assume-se que o sinal da janela é impulsivo [17]. Para obter esse limiar, foi construída uma curva ROC a fim de permitir a escolha do ponto de operação, em nossos experimentos usados valores de TPR > 90%.

$$E_{Jan} = \sum_k |X(k)|^2 \quad (3)$$

$$D_{Jan} = \frac{E_{(Jan+1)} - E_{(Jan-1)}}{3} \quad (4)$$

Esse método não requer o treinamento da classificação, pois baseia-se simplesmente nas duas condições descritas pelas Equações (5) e (6) [17].

$$S1 : E_{(f > 1600Hz)} > 2E_{(f < 1600Hz)} \quad (5)$$

$$S2 : Impulso(i) - Impulso(i - 1) > 0.2 \quad (6)$$

A Tabela 6 indica como ocorre a classificação nesse método de acordo com as condições S1 e S2 [17].

**Tabela 6** - Classificação pelo Método da Análise Espectral de Energia

| S1 |            |            |       |
|----|------------|------------|-------|
|    |            | Verdadeiro | Falso |
| S2 | Verdadeiro | SW         | NT    |
|    | Falso      | NT         | MB    |

### 3.2.3 Análise da SNR

Neste método, a obtenção do limiar de detecção é realizada pela energia normalizada do sinal ( $Z$ ) [18]. Se o valor de  $Z$  de uma janela for superior a um limiar, então existe um sinal impulsivo nessa janela. Seja  $x(n) = hs(n) + r(n)$ , em que  $r(n)$  é o ruído (consi-

derado branco gaussiano),  $s(n)$  é o sinal impulsivo que existe caso  $h = 1$  (condição da presença de sinal impulsivo). Se  $h = 0$ , a janela em questão não apresenta um sinal impulsivo [17]. Assim, a energia do sinal da janela normalizada pela energia do ruído naquela janela (parâmetro  $Z$ ) é dada pela Equação (7) [18].

$$Z = \frac{1}{\sigma_r^2} \sum_{n \in \text{janela}} x^2(n), \quad (7)$$

em que  $\sigma_r^2 = \sum_{n \in \text{janela}} r^2(n)$  é uma estimativa da energia do ruído.

O treinamento da detecção desse método se inicia pela obtenção do parâmetro  $a = WT$ , em que  $W$  é a largura de banda dos sinais que têm SW ou MB, e  $T$  é o período de amostragem. Em seguida, é determinado o menor valor da SNR das janelas de SW e MB que, com o parâmetro  $a$ , é usado para computar  $P_m$  (probabilidade de perder um sinal impulsivo) e  $P_{fa}$  (probabilidade de indicar que uma janela sem impulso é impulsiva), conforme as Equações (8) e (9), em que  $\Gamma$  é a função Gamma,  $\gamma$  é a função Gamma incompleta inferior,  $Q_a$  é a função Marcum Q Generalizada e  $\lambda$  é o decisor [18].

$$P_{fa} = FP = 1 - \frac{\Gamma(a, \frac{\lambda}{2})}{\Gamma(a)} \quad (8)$$

$$P_m = FN = 1 - Q_a(\sqrt{2\gamma}, \sqrt{\lambda}) \quad (9)$$

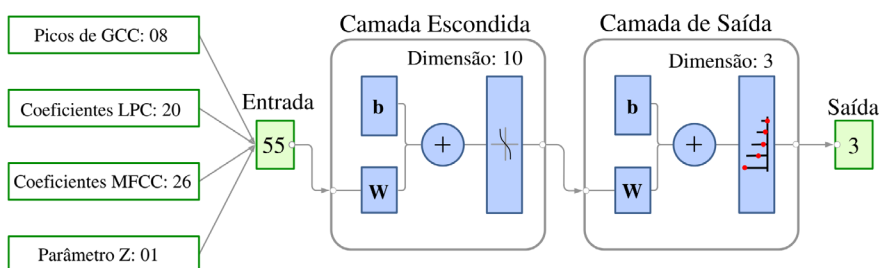
Em seguida, os gráficos de probabilidades de  $P_{fa}$  e de  $P_m$  em função de  $\lambda$  são obtidos. O gráfico de  $P_m$  é uma função crescente com o aumento de  $\lambda$ , enquanto o gráfico de  $P_{fa}$  é uma função decrescente [18]. O ponto de operação escolhido para este artigo foi  $P_{fa} < 2\%$ .

Para o treinamento da classificação, foram utilizados 18 parâmetros (8 picos de correlação cruzada e 10 coeficientes LPC) como entrada no aplicativo Classification Learner do Matlab®. A função gerada pelo algoritmo de SVM Kernel foi escolhida como critério de classificação devido ao seu melhor desempenho para esse método.

### 3.2.4 Classificação usando redes neurais

Originalmente, este método não distinguia claramente entre detecção e classificação. Para aprimorá-lo, optamos por incorporar o mecanismo de detecção utilizado no método da SNR [18]. No processo de treinamento da etapa de classificação, utilizamos o aplicativo Neural Pattern Recognition do Matlab®. A entrada consistiu em um vetor de 55 elementos, composto por 8 picos de correlação cruzada, 20 coeficientes LPC, 26 coeficientes MFCC e 1 parâmetro  $Z$ . A saída desse aplicativo foi modelada por uma função simulando uma rede neural *feed-forward* de duas camadas: uma camada escondida com dez neurônios (função de ativação sigmoide) e uma camada de saída com três neurônios (função de ativação *softmax*). O algoritmo empregado para o treinamento foi o do Conjugado Gradiente Escalado (*Scaled Conjugate Gradient*). A Figura 4 ilustra a arquitetura da rede neural utilizada neste método.

**Figura 4** - Estrutura da rede *feed-forward* usada na classificação pelo Método da Rede Neural.



## 4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A Tabela 7 exhibe a análise dos resultados do treinamento, destacando as métricas TPR e FPR para cada um dos métodos, abrangendo tanto a etapa de detecção quanto a etapa de classificação.

Os tempos de execução são detalhados na Tabela 8. Todo o processamento, incluindo treinamento e teste, foi conduzido no ambiente Matlab® utilizando um computador equipado com um processador Intel® Core™ i5-8250U CPU @1.60GHz 1.80 GHz e 8 GB de RAM, sem SSD.

Observa-se que o método da Análise Espectral da Energia apresentou o menor tempo de execução em janelas com impulsos, resultado atribuído ao fato de que o seu algoritmo de classificação dispensa a necessidade de se obter novos parâmetros. O método que utiliza Redes Neurais obteve o segundo melhor desempenho nesse aspecto, mesmo tendo um número maior de parâmetros. Esse resultado se deve à robustez do algoritmo de classificação desse método, que é, ao mesmo tempo, mais simples em comparação com a abordagem de SVM Kernel, uma técnica não linear.

**Tabela 7** - Resultado do treinamento

| Método                       | TPR     | FPR    |
|------------------------------|---------|--------|
| Correlação Cruzada           | 93,79 % | 6,21 % |
| Análise Espectral da Energia | 90,03 % | 4,70 % |
| Análise da SNR               | 97,27 % | 5,25 % |
| Redes Neurais                | 95,83 % | 2,28 % |

**Tabela 8** - Tempo de execução

| Método                       | Janela sem impulso | Janela com impulso |
|------------------------------|--------------------|--------------------|
| Correlação Cruzada           | 2,26 ms            | 6,49 ms            |
| Análise Espectral da Energia | 3,65 ms            | 3,82 ms            |
| Análise da SNR               | 1,13 ms            | 11,72 ms           |
| Redes Neurais                | 1,02 ms            | 4,80 ms            |

A Tabela 9 apresenta os resultados brutos do teste. Nota-se que o método da Correlação Cruzada conseguiu detectar todos os SWs, mas apresentou uma detecção relativamente baixa de MBs em comparação com os outros métodos. O método das redes neurais, por sua vez, alcançou a detecção e classificação do maior número de MBs.

**Tabela 9** - Resultados Brutos (janelas corretas)

| Método                       | SW (60) | MB (60) | NT (36476) |
|------------------------------|---------|---------|------------|
| Correlação Cruzada           | 60      | 17      | 36471      |
| Análise Espectral da Energia | 56      | 31      | 36461      |
| Análise da SNR               | 53      | 48      | 36471      |

| Método        | SW (60) | MB (60) | NT (36476) |
|---------------|---------|---------|------------|
| Redes Neurais | 55      | 54      | 36457      |

A Tabela 10 mostra os erros de classificação durante o teste. Nela, é possível verificar que os métodos da análise da SNR e das redes neurais apresentaram um número de erros total menor em relação com os outros métodos.

**Tabela 10** - Erros brutos (janelas erradas)

|         | Correlação Cruzada (48) | Análise Espectral da Energia (67) | Análise da SNR (19) | Redes Neurais (30) |
|---------|-------------------------|-----------------------------------|---------------------|--------------------|
| SW → MB | 0                       | 1                                 | 7                   | 5                  |
| SW → NT | 0                       | 2                                 | 0                   | 0                  |
| MB → SW | 0                       | 3                                 | 2                   | 1                  |
| MB → NT | 43                      | 26                                | 10                  | 5                  |
| NT → SW | 0                       | 1                                 | 1                   | 4                  |
| NT → MB | 5                       | 34                                | 4                   | 15                 |

A Tabela 11 apresenta os resultados de um coeficiente autoral sugerido, conforme indicado pela Equação (10), no qual o TPR do MB é priorizado em relação ao TPR do SW. Essa escolha foi feita devido ao fato de o algoritmo de estimação da direção do caçador fazer uso das informações do MB como dados de entrada. Sob essa perspectiva, o método que utiliza as redes neurais obteve o melhor resultado.

$$\text{Coeficiente} = \frac{3TPR_{SW} + 5TPR_{MB}}{8} \quad (10)$$

**Tabela 11** - Coeficiente Equação (10)

| Método                       | TPR <sub>SW</sub> | TPR <sub>MB</sub> | Coeficiente |
|------------------------------|-------------------|-------------------|-------------|
| Correlação Cruzada           | 1                 | 0,283             | 0,552       |
| Análise Espectral da Energia | 1                 | 0,516             | 0,697       |
| Análise da SNR               | 0,933             | 0,8               | 0,849       |
| Redes Neurais                | 0,916             | 0,9               | 0,906       |

A Tabela 12 exhibe os resultados pelo coeficiente Taxa de Erro, dado pela Equação (11) [21], em que  $N = 36596$  representa o número total de janelas. Nota-se

que, para essa métrica, o método da análise da SNR apresentou um melhor resultado frente aos erros.

$$Taxa\ de\ Erro = \frac{FN + FP}{N} \quad (11)$$

**Tabela 12** - Taxa de erro

| Método                       | FN | FP | Taxa de Erro |
|------------------------------|----|----|--------------|
| Correlação Cruzada           | 43 | 5  | 0,13 %       |
| Análise Espectral da Energia | 25 | 35 | 0,16 %       |
| Análise da SNR               | 17 | 5  | 0,06 %       |
| Redes Neurais                | 11 | 19 | 0,08 %       |

A Tabela 13 exibe os resultados de cada algoritmo diante da aplicação do coeficiente *F1 Score*, conforme definido na Equação (12). Esse coeficiente é importante na análise de conjuntos de dados com grandes discrepâncias no número de amostras entre as classes [21], como verificado nos sinais de teste.

$$F1 = \frac{2TP}{2TP + FP + FN} \quad (12)$$

Considerando todos os resultados apresentados, o método que utiliza redes neurais foi considerado o mais adequado para a detecção e classificação de sinais de tiro. Ele demonstrou um desempenho robusto na classificação de MB e sua complexidade computacional, dado que o treinamento ocorre *offline*, é baixa.

**Tabela 13** - Coeficiente *F1 Score*

| Método                       | TP    | FN | FP | F1 (%)  |
|------------------------------|-------|----|----|---------|
| Correlação Cruzada           | 36818 | 43 | 5  | 99,9348 |
| Análise Espectral da Energia | 36806 | 25 | 35 | 99,9185 |
| Análise da SNR               | 36844 | 17 | 5  | 9,9701  |
| Redes Neurais                | 36836 | 11 | 19 | 99,9592 |

Os resultados provenientes da aplicação do método utilizando redes neurais, aqui considerado o mais adequado à presente aplicação, na base proveniente de [27] estão apresentados na Tabela 14. Nesse contexto, a situação campestre refere-se aos sinais de tiro originados das bases utilizadas neste artigo (ambiente rural) enquanto o cenário urbano diz respeito à base de tiros de [27]. Mesmo quando empregado em um conjunto de disparos de

armas de fogo distintas daquelas usadas no treinamento, destacando-se a ausência de características supersônicas nos projéteis e um elevado grau de multipercurso típicos de ambientes urbanos, o método demonstrou habilidade na separação do MB, alcançando uma TPR superior a 70% para todos os armamentos usados em [27].

**Tabela 14** - Resultados do teste na base urbana [27] com treinamento na base rural

|       | Calibre.45 | Calibre.40 | Calibre 9 mm |
|-------|------------|------------|--------------|
| MB→MB | 80         | 79         | 92           |
| MB→NT | 28         | 29         | 16           |
| NT→MB | 4          | 5          | 17           |
| TPR   | 74,07%     | 73,15%     | 85,18%       |

A Tabela 15 apresenta os resultados do treinamento e do teste contemplando as diversas configurações de treinamento/teste.

**Tabela 15** - Resultados dos testes com diferentes tipos de treinamento e cenários de teste

| Treinamento | Teste     | TPR     |
|-------------|-----------|---------|
| Campestre   | Campestre | 95,83 % |
|             | Urbano    | 77,47 % |
| Urbano      | Campestre | 90,56 % |
|             | Urbano    | 88,88 % |
| Misto       | Campestre | 90,56 % |
|             | Urbano    | 85,18 % |

## 5. Conclusão

A principal meta deste projeto [28] consistiu em replicar e comparar algoritmos de detecção e classificação de sinais impulsivos em três categorias: SW (onda de choque), MB (estouro no cano) ou NT (outro tipo de evento impulsivo). Com essa finalidade, foram desenvolvidas rotinas no ambiente Matlab® para as etapas de treinamento e de teste de cada um dos quatro métodos avaliados neste artigo. Além disso, visando aprimorar os resultados de classificação, foram sugeridas algumas modificações no método da Correlação Cruzada e no método que emprega redes neurais.

O foco primordial deste trabalho foi direcionado às aplicações militares, em tempo real, destinadas a

atender às possíveis necessidades no combate a caçadores. A automação dos procedimentos de detecção e classificação tem o potencial de integrar de forma eficaz requisitos de software e hardware voltados à estimação da DOA de atiradores. Como resultado, os soldados podem, ao dispor de informações sobre a direção de disparos, desfrutar de maior proteção contra ameaças letais por terem melhores condições de buscar abrigo ou neutralizar franco-atiradores.

Este estudo buscou comparar e otimizar os algoritmos de detecção de sinais de tiros. Ao observar que o método da Correlação Cruzada, baseado em [7], carecia de uma metodologia clara para distinguir entre SW e MB, utilizamos mais sinais de referências e um esquema de classificação baseado em RBF SVM Kernel; contudo, este método ainda enfrentou dificuldades em diferenciar claramente os componentes de SW. Por outro lado, o método da análise espectral da energia apresentado, conforme apresentado em [17], não obteve bons resultados na classificação de tiros, uma vez que sua eficácia dependia das características do armamento e da geometria do ambiente (posições relativas do atirador, alvo e microfone). Em relação ao método da SNR, descrito em [18], verificou-se que ele se mostrou robusto na detecção de sinais impulsivos, porém ainda carecia de aprimoramento na classificação das componentes MB, informação mais relevante para as aplicações consideradas. Finalmente, o método que emprega redes neurais, tal como descrito em [19], não apresentava uma clara distinção entre as etapas de detecção e classificação. Para aprimorá-lo, foi sugerida a adoção do mesmo processo de detecção conforme delineado em [18], com a metodologia de

[17] sendo utilizada para a obtenção do critério de classificação. Esse método, com as adaptações sugeridas, foi considerado o mais adequado para o propósito deste trabalho, resultando numa taxa de acerto de MB superior entre os quatro métodos avaliados.

As redes neurais utilizadas neste trabalho foram do tipo *feed-forward* com duas camadas geradas pelo aplicativo Classification Learner do Matlab®. Uma possível extensão deste estudo, abordando o estado da arte em métodos de detecção e classificação de sinais de tiro, poderia incluir uma investigação sobre o uso de redes neurais profundas e redes neurais convolucionais no processamento de imagens geradas a partir dos espectrogramas dos sinais de tiro. Essa abordagem pode abrir novas perspectivas para o aprimoramento desses métodos e sua aplicação em situações práticas de combate.

A utilização do método que identificamos como o mais eficaz para gravações realizadas em ambientes rurais, como estandes de tiros e campos de instrução, em uma segunda base de dados contendo tiros provenientes de um ambiente urbano, trouxe novas perspectivas sobre a aplicabilidade dessa técnica. Verificou-se que, apesar dos bons resultados obtidos com o treinamento em ambiente campestre, a utilização desse método em cenários urbanos apresenta desafios adicionais e requer um treinamento específico com sinais coletados nesse contexto. A estratégia de empregar um treinamento híbrido para aplicação em ambos os ambientes, rural e urbano, resultou em uma redução na taxa de positivos verdadeiro (TPR) entre 3,7% (ambiente urbano) e 5,3% (ambiente rural), em comparação com a situação em que o treinamento e teste ocorrem no mesmo ambiente.

## REFERÊNCIAS

- [1] PALAVENIS, D. The use of emerging disruptive technologies by the Russian Armed Forces in the Ukrainian War. **Air Land Sea Application Center**. Hampton, 1 out. 2022. Disponível em: <https://www.alssa.mil/News/Article/3170285/the-use-of-emerging-disruptive-technologies-by-the-russian-armed-forces-in-the/>. Acesso em: 7 jun. 2025.
- [2] SOUZA, G. L. **História Militar**: o emprego do caçador. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Aperfeiçoamento Militar) – Escola de Aperfeiçoamento Militar, [s. l.], 2020. Disponível em: <http://bdex.eb.mil.br/jspui/handle/123456789/6570>. Acesso em: 7 jun. 2025.
- [3] Círculo de fogo. Direção: Jean-Jacques Annaud. Produção de Mandalay Pictures. Estados Unidos: Paramount Pictures, 2001.
- [4] Sniper Americano. Direção: Clint Eastwood. Produção de Village Roadshow Studios e Malpaso Productions. Estados Unidos: Warner Bros, 2014.



- [5] SLAWSON, L. The Top Ten Deadliest Snipers in History. **Owlcation**, September 15<sup>th</sup>, 2023. Disponível em: <https://owlcation.com/humanities/Top-Ten-Deadliest-Snipers-in-History>. Acesso em 9 jun. 2025.
- [6] FREYTAG, J. C.; BRUSTAD, B. M. A survey of audio forensic gunshot investigations. In: AES International Conference: Audio Forensics in the Digital Age, 26., 2005, Denver. **Anais [...]**. Denver: Audio Engineering Society, p. 131-134, 2005.
- [7] FREIRE, I. L.; APOLINÁRIO JR., J. A. Gunshot detection in noisy environments. In: International Telecommunication Symposium (ITS), 7., 2010, Manaus. **Anais [...]**. Manaus: ITS, p. 1-4, 2010.
- [8] SERRENHO, F. G. **Estimação robusta da direção de chegada de sinais de tiros a partir de VANT de asa rotativa**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Instituto Militar de Engenharia (IME), Rio de Janeiro, Brasil, 2020.
- [9] BORZINO, A. M. C. R. *et al.* Signal enhancement for gunshot DOA estimation with median filters. In: *IEEE Latin American Symposium on Circuits and Systems (LASCAS)*, 6., 2015, Montevideo. **Anais [...]**. Montevideo, 2015.
- [10] BORZINO, A. M. C. R.; APOLINÁRIO JR., J. A.; CAMPOS, M. L. R. Robust DOA estimation of heavily noisy gunshot signals. In: *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP)*, 2015, Brisbane. **Anais [...]**. Brisbane: IEEE, 2015. p. 449-453.
- [11] FREIRE, I. L.; APOLINÁRIO JR., J. A. GCC-based DoA estimation of overlapping muzzleblast and shockwave components of gunshot signals. *Latin American Symposium on Circuits and Systems (LASCAS) 2.*, 2011, Bogotá. **Anais [...]**. Bogotá: IEEE, 2011. <https://doi.org/10.1109/LASCAS.2011.5750273>.
- [12] BORZINO, A. M. C. R. **Processamento de sinais de áudio proveniente de disparo de arma de fogo e Aplicações**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia de Defesa) – Instituto Militar de Engenharia (IME), Rio de Janeiro, Brasil, 2016.
- [13] BORZINO, A. M. C. R.; APOLINÁRIO JR., J. A.; CAMPOS, M. L. R. Consistent DOA estimation of heavily noisy gunshot signals using a microphone array. **IET Radar, Sonar & Navigation**, Stevenage, p. 1517-1728, 2016.
- [14] MAGAND, F.; Donzier, A.; Molliex, F. **PILAR Acoustic Gunshot Detection & Localization system: principles of acoustic localization of small caliber gunshots**. Joint Congress CFA–DAGA, Strasbourg, France, 2004.
- [15] Raytheon Intelligence & Space, “Boomerang Gunshot Detection: Locate the Enemy - Coordinate the Response”. **Raytheon BBN Technologies**, Cambridge, 2020. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/532314657/boomerang-data-sheet-soft-copy-final>. Acesso em: 9 jun. 2025.
- [16] TRANSVARO SAVUNMA SANAYI A.Ş. **TV-SD 500 Acoustic Sniper Detection System: user manual**. İstanbul; Ankara: Transvaro Savunma Sanayi A.Ş., [s.d.]. Disponível em: <https://www.transvaro.com/wp-content/uploads/akustik-eng.pdf>. Acesso em: 7 jun. 2025.
- [17] MÄKINEN, T.; PERTILÄ, P. Shooter localization and bullet trajectory, caliber, and speed estimation based on detected firing sounds. **Applied Acoustics**, Amsterdam, v. 71, n. 10, p. 902-913, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2010.05.021>
- [18] AHMED, T.; UPPAL, M.; MUHAMMAD, A. Improving efficiency and reliability of gunshot detection systems. In: *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP)*, 2013, Vancouver. **Anais [...]**. Vancouver: IEEE, 2013. p. 513-517.
- [19] HRABINA, M.; SIGMUND, M. Comparison of feature performance in gunshot detection depending on noise degradation. In: *International Conference Radioelektronika*, 27., 2017, Brno. **Anais [...]**. Brno: 2017. p. 223-226.
- [20] MAHER, R. C. Modeling and signal processing of acoustic gunshot recordings. *Signal Processing Education Workshop, Teton National Park, 4.*, Piscataway, 2006. **Anais [...]**. Piscataway: IEEE, 2006. pp. 257-261. <https://doi.org/10.1109/DSPWS.2006.265386>.
- [21] LARNER, A. J. **The 2×2 Matrix Contingency, Confusion, and the Metrics of Binary Classification**. Liverpool: Springer Nature Switzerland AG, 2021. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-74920-0>
- [22] INDÚSTRIA DE MATERIAL BÉLICO DO BRASIL (IMBEL). **Manual do Fuzil .308 – IMBEL AGLC**: instruções de operação, manutenção e características técnicas. Brasília: IMBEL, 2018. Disponível em: <https://www.imbel.gov.br/phocadownload/produtos/manuais/fz-ca/manual-fzaglc308.pdf>. Acesso em: 7 jun. 2025.
- [23] BRASIL. Ministério do Exército. **Manual de Campanha C-23-65**: Metralhadora .50 M2. 3. ed. Rio de Janeiro: Ministério do Exército, 1963. Disponível em: <https://bdex.eb.mil.br/jspui/bitstream/123456789/425/5/C-23-65-final.pdf>. Acesso em: 7 jun. 2025.
- [24] INDÚSTRIA DE MATERIAL BÉLICO DO BRASIL (IMBEL). **Manual do Fuzil 7,62 M964–FAL / M964A1–PARAFAL**: operação, manutenção e características técnicas. Brasília, DF: IMBEL, 2014. Disponível em: <https://www.imbel.gov.br/phocadownload/produtos/manuais/fz-ca/manual-fz762m964.pdf>. Acesso em: 7 jun. 2025.
- [25] INDÚSTRIA DE MATERIAL BÉLICO DO BRASIL (IMBEL). **Manual do Usuário do Fuzil de Assalto 5,56 – IMBEL A2**: operação e manutenção. Brasília, DF: IMBEL, 2017. Disponível em: <https://www.imbel.gov.br/phocadownload/produtos/manuais/fz-ca/manual-fuzil-imbel-556-IA2.pdf>. Acesso em: 7 jun. 2025.
- [26] BEHRINGER. ECM8000: Ultra-linear measurement condenser microphone – Technical Specifications, Music Tribe Global Brands Ltd., 2021. Disponível em: <https://www.behringer.com/product.html?modelCode=0506-AAA>. Acesso em: 7 jun. 2025.
- [27] CALHOUN, R. B. *et al.* Precision and accuracy of acoustic gunshot location in an urban environment. **ShotSpotter Inc.**, Newark, v. 1, p.9-16, 2020. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2108.07377>
- [28] SILVA, R. L. A. **Sistema Detector e Localizador de Caçador**. Projeto de Final de Curso (Bacharelado em Engenharia de Comunicações) – Instituto Militar de Engenharia (IME), Rio de Janeiro, Brasil, 2023.







# PÓS-GRADUAÇÃO NO IME

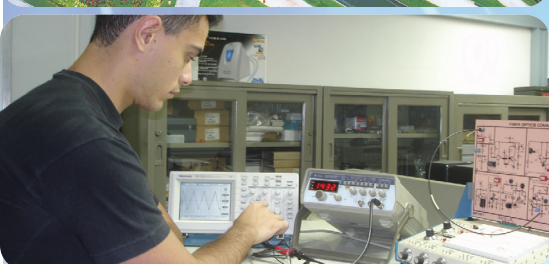
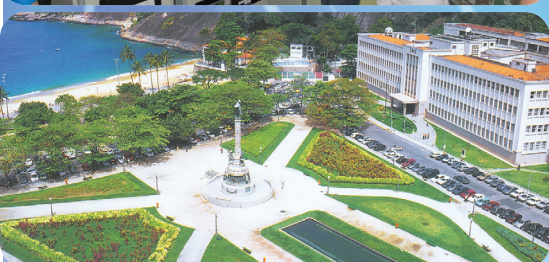
Bolsas: CAPES, CNPq e FAPERJ

## Mestrado

- Sistemas e Computação
- Engenharia Mecânica

## Mestrado e Doutorado

- Química
- Ciência dos Materiais
- Engenharia de Defesa
- Engenharia Nuclear
- Engenharia Elétrica
- Engenharia de Transportes



Matrículas: Semestral

Tel.: (21) 2546-7114 – Fax: (21) 2546-7089 – [www.ime.eb.br](http://www.ime.eb.br) – [sd1@ime.eb.br](mailto:sd1@ime.eb.br)