



REVISTA MILITAR de CIÊNCIA e TECNOLOGIA

Versão impressa: ISSN 0102-3543

Volume XL - 2º Trimestre de 2023

ENGENHARIA MILITAR

**Mobilidade,
Contramobilidade e
Proteção**

O Impacto da Ponderação de Recursos Semânticos para Identificação de Suspeitos de Crimes em Redes Sociais - Pág 3

Estudo de densificação e morfologia de cerâmicas de alumina dopadas com nióbia e sílica processadas com técnica de gradiente funcional - Pág 15

Estimação de azimute a partir de múltiplas conformações de feixe fixas em sistema radar com arranjo de antenas - Pág 23

Uma revisão sobre materiais a serem empregados em placas balísticas do tipo *stand alone* conforme Requisitos Operacionais Conjuntos do Ministério da Defesa - Pág 35

Avaliação de propriedades mecânicas de chapas laminadas das ligas de alumínio AA 5052 e AA 5050C - Pág 59

Resistência balística e propriedades de absorção de micro-ondas de um composto feito de tecido de aramida impregnado com polietilenoglicol e nanopartículas de hematita - Pág 67

Influência do tratamento de superfície na estabilidade primária dos implantes dentários osseointegráveis quantificada com *strain gauge* - Pág 74





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 • Diagramador: 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: divcmcl@graficadoexercito.eb.mil.br

PUBLICAÇÃO TRIMESTRAL



REVISTA MILITAR de CIÊNCIA e TECNOLOGIA

**REVISTA MILITAR DE CIÊNCIA E
TECNOLOGIA - Volume XL**

2º 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

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





Os séculos XX e XXI foram profundamente moldados por conflitos armados que redefiniram fronteiras, ideologias e sociedades. A Primeira Guerra Mundial inaugurou uma nova era de guerra industrializada, com milhões de mortos e o colapso de impérios como o Austro-Húngaro e o Otomano. Logo depois, a Segunda Guerra Mundial se tornou maior conflito da história, envolvendo quase todo o planeta, resultando no Holocausto, no uso de armas nucleares e na criação da ONU. Durante a chamada Guerra Fria, conflitos como a Guerra da Coreia (1950–1953) e a Guerra do Vietnã (1955–1975) refletiram a disputa ideológica entre EUA e URSS. Já no Oriente Médio, guerras como a Guerra do Golfo (1990–1991) e os conflitos contínuos envolvendo Israel e Palestina marcaram o cenário geopolítico. No século XXI, a Guerra do Afeganistão (2001–2021) e a Guerra do Iraque (2003–2011) foram respostas aos ataques de 11 de setembro, com consequências duradouras. Mais recentemente, a invasão da Ucrânia pela Rússia em 2022 reacendeu tensões globais, lembrando que os ecos da guerra ainda ressoam fortemente no mundo contemporâneo, mas com um grande diferencial: o uso de novas doutrinas militares e equipamentos nunca antes imaginados, tais como os drones. Em outras palavras, a inovação, mais do que nunca, se faz presente em todos os teatros de operações dos conflitos atuais. Em um cenário global cada vez mais orientado por dados, precisão e segurança, o Brasil vem se destacando em diversas frentes de pesquisa aplicada. A interseção entre ciência de materiais, engenharia de sistemas e inteligência artificial revela um ecossistema acadêmico e tecnológico vibrante, comprometido com soluções que vão do campo da defesa à saúde bucal. Este editorial propõe uma reflexão sobre sete estudos que ilustram esse avanço multifacetado fortemente baseado na inovação.

O estudo sobre *O Impacto da Ponderação de Recursos Semânticos para Identificação de Suspeitos de Crimes em Redes Sociais* aponta para uma nova era na segurança pública. Ao empregar algoritmos capazes de interpretar nuances linguísticas e contextuais, pesquisadores ampliam a capacidade de detectar comportamentos suspeitos em ambientes digitais. Essa abordagem não apenas reforça a prevenção de crimes, como também levanta debates éticos sobre privacidade e vigilância.

A *pesquisa sobre cerâmicas de alumina dopadas com nióbia e sílica*, processadas com técnica de gradiente funcional, representa um salto na engenharia de materiais. A densificação e morfologia controladas dessas cerâmicas prometem aplicações em ambientes extremos, como blindagens e componentes aeroespaciais, onde resistência térmica e mecânica são cruciais.

No campo da defesa e navegação, a *estimação de azimute a partir de múltiplas conformações de feixe fixas em sistemas radar com arranjo de antenas* oferece avanços significativos. Essa técnica permite maior acurácia na localização de alvos, mesmo em cenários de interferência ou baixa visibilidade, reforçando a soberania tecnológica nacional.

A *revisão sobre materiais para placas balísticas do tipo stand alone*, conforme os Requisitos Operacionais Conjuntos do Ministério da Defesa, evidencia o esforço contínuo em alinhar pesquisa científica com demandas estratégicas. A busca por materiais leves resistentes e economicamente viáveis é essencial para garantir proteção eficaz sem comprometer mobilidade.

A *avaliação das propriedades mecânicas das ligas de alumínio AA 5052 e AA 5050C* em chapas laminadas revela o potencial dessas ligas em aplicações estruturais. Combinando leveza e resistência, elas são candidatas ideais para setores como transporte, construção civil e defesa.

A inovação também se manifesta na *criação de compostos de tecido de aramida impregnado com polietilenoglicol e nanopartículas de hematita*. Além da resistência balística, esses materiais apresentam propriedades de absorção de micro-ondas, sugerindo aplicações em blindagens furtivas e proteção contra radiação eletromagnética.

Por fim, a *influência do tratamento de superfície na estabilidade primária de implantes dentários ósseo-integráveis*, quantificada com strain gauge, mostra como a engenharia de precisão pode transformar a odontologia. A melhoria da integração óssea e da durabilidade dos implantes tem impacto direto na qualidade de vida dos pacientes.

Em conclusão, esses estudos, embora diversos em escopo, convergem em um ponto comum: o compromisso com a excelência científica e a aplicabilidade prática. Eles refletem um Brasil que investe em conhecimento para proteger, inovar e cuidar. Em tempos de incerteza global, essa é uma aposta que vale ouro. 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

- 4** O Impacto da Ponderação de Recursos Semânticos para Identificação de Suspeitos de Crimes em Redes Sociais
Érick S. Florentino, Ronaldo R. Goldschmidt, Maria Cláudia Cavalcanti
- 16** Estudo de densificação e morfologia de cerâmicas de alumina dopadas com nióbia e sílica processadas com técnica de gradiente funcional
Anderson Alves Mota, Alaelson Vieira Gomes
- 24** Estimação de azimuth a partir de múltiplas conformações de feixe fixas em sistema radar com arranjo de antenas
Vitor Augusto Ferreira Santa Rita, Alberto Gaspar Guimarães, Ernesto Leite Pinto
- 36** Uma revisão sobre materiais a serem empregados em placas balísticas do tipo *stand alone* conforme Requisitos Operacionais Conjuntos do Ministério da Defesa
Jeremias Fortini, Frederico Dal Berto, Altair Soria Pereira, Eduardo Sousa Lima
- 60** Avaliação de propriedades mecânicas de chapas laminadas das ligas de alumínio AA 5052 e AA 5050C
Isabella Cristina da Silva Jorge, Natália Barros Barony, Ângelo Siqueira da Silva, Talita Gama de Sousa, Saulo Brinco Diniz, Andersan dos Santos Paula
- 68** Resistência balística e propriedades de absorção de micro-ondas de um composto feito de tecido de aramida impregnado com polietilenoglicol e nanopartículas de hematita
Danúbia Bordim de Carvalho
- 75** Influência do tratamento de superfície na estabilidade primária dos implantes dentários osseointegráveis quantificada com *strain gauge*
Larissa Ramos Xavier Coutinho Nascimento, Carlos Nelson Elias, Guilherme Monteiro Torelly

O Impacto da Ponderação de Recursos Semânticos para Identificação de Suspeitos de Crimes em Redes Sociais

Érick S. Florentino¹, erick.florentino@ime.eb.br, Orcid 0000-0002-0828-4058
Ronaldo R. Goldschmidt¹, ronaldo.rgold@ime.eb.br, Orcid 0000-0003-1688-0586
Maria Cláudia Cavalcanti, yoko@ime.eb.br, Orcid 0000-0003-4965-9941
¹Instituto Militar de Engenharia – IME

RESUMO: A identificação de pessoas suspeitas de crimes em redes sociais tem sido um tema de grande relevância na análise desse tipo de rede. Na maioria das vezes, os métodos que buscam identificar esses suspeitos utilizam dados textuais disponibilizados pelas pessoas nessas redes (e.g. mensagens, comentários, entre outros). Para analisar os textos, tais métodos costumam utilizar recursos semânticos como vocabulários controlados ou até mesmo simples conjuntos compostos por termos, de acordo com o domínio em questão (e.g. terrorismo, pedofilia, entre outros). A menção de um ou mais desses termos pode levantar suspeitas sobre as pessoas que os utilizaram. No entanto, há termos que levantam mais suspeitas do que outros. Assim sendo, este trabalho busca investigar o impacto da diferenciação do nível de periculosidade dos termos utilizados por um método de identificação de suspeitos de crimes em redes sociais e se isso pode levar a melhores resultados na identificação dos suspeitos. Os resultados obtidos por meio de experimentos no domínio da pedofilia mostraram que a diferenciação do nível de periculosidade dos termos proporcionou melhores resultados em 82.5% dos experimentos realizados.

PALAVRAS-CHAVE: Suspeitos. Redes Sociais, Recursos Semânticos.

ABSTRACT: The identification of criminal suspects on social media has been a topic of great relevance in the analysis of this type of media. Most of the time, the methods that seek to identify these suspects use textual data made available by people on these networks (e.g. messages, comments, among others). To analyze the texts, these methods often use semantic resources such as controlled vocabularies or even simple sets composed of terms, according to the domain in question (e.g. terrorism, pedophilia, among others). The mention of one or more of these terms can raise suspicions about the people who have used them. However, some terms raise more suspicion than others. Therefore, this work seeks to investigate the impact of differentiating the level of dangerousness of the terms used by a method for identifying criminal suspects on social media and whether this can lead to better results in identifying suspects. The results obtained through experiments in the domain of pedophilia showed that differentiating the level of dangerousness of the terms provided better results in 82.5% of the experiments carried out.

KEYWORDS: Suspects. Social Media, Semantic Resources.

1. Introdução

Redes sociais (e.g., X - antigo Twitter, YouTube, Instagram, Facebook, entre outras) fazem parte do cotidiano da grande maioria da sociedade [1]. Diariamente, um grande volume de dados é disponibilizado nessas redes por meio de diversas funcionalidades, tais como compartilhamento de vídeos e troca de mensagens [2]. Além disso, essas redes permitem interações em tempo real, sem ter o espaço geográfico como limitação [3]. Devido a isso, a *Análise*

de Redes Sociais¹ tem sido de grande interesse para instituições públicas e privadas para os mais diferentes fins [5].

Uma das tarefas de Análise de Redes Sociais que tem tido grande relevância nos últimos anos é a identificação de pessoas suspeitas de crimes em redes sociais (ex. pedofilia, bullying, terrorismo) [6] [7] [8]. Isso se deve ao crescente número de pessoas que têm utilizado os recursos existentes nas redes a fim de praticar atos que podem trazer riscos a outras pessoas, tanto externamente quanto internamente a esses ambientes virtuais [9] [10]. Por exemplo, tais atos podem gerar

¹ Expressão dada a qualquer conjunto de atividades que busque extrair conhecimento sobre os indivíduos que utilizam as redes sociais [4].

algum tipo de impacto psicológico e/ou físico nas pessoas [4].

Na literatura, uma parte significativa dos métodos que buscam identificar pessoas que praticam crimes em redes sociais se baseia em análises do conteúdo textual disponibilizado pelas pessoas [11] [12] [7]. Essa análise, por diversas vezes, conta com o apoio de um vocabulário controlado ou um conjunto composto por termos comumente usados por pessoas suspeitas no domínio da aplicação [11] [13]. Esses vocabulários ou conjunto de termos podem conter expressões com diferentes níveis de “periculosidade”². Existem métodos que buscam diferenciar esses níveis [14] [15] [16] e outros que não [12] [11] [17]. Diante desse cenário, surgem as seguintes questões de pesquisa: *Qual o impacto da diferenciação dos níveis de periculosidade dos termos suspeitos de um vocabulário ou conjunto de termos? Tal diferenciação pode levar a melhores resultados na identificação de pessoas suspeitas de crimes em redes sociais?*

A fim de buscar evidências que respondam aos questionamentos acima, o trabalho descrito neste artigo realizou experimentos com o método INSPECTION³ [14], considerando cinco conjuntos de dados, de duas maneiras. Na primeira, todos os termos foram ponderados com um único peso, ou seja, sem diferenciar o seu nível de periculosidade. Já na segunda, diferenciou-se o nível de periculosidade de cada grupo de termos. A partir dos experimentos realizados, foi possível verificar que a ponderação dos níveis de periculosidade dos termos do vocabulário controlado levou a melhores resultados em 82.5% desses experimentos, respondendo positivamente às questões de pesquisa levantadas.

O restante do trabalho está organizado como se segue. Na Seção 2, são apresentados alguns conceitos básicos relacionados à análise de redes sociais e dados não estruturados (textos). Já na Seção 3, são apresentados alguns trabalhos que buscam identificar pessoas

suspeitas de crimes por meio do uso de vocabulários controlados ou conjuntos de termos de acordo com o domínio da aplicação. O método INSPECTION, bem como suas etapas, são descritos de forma resumida na Seção 4. Detalhes sobre os experimentos realizados e sobre os resultados obtidos estão na Seção 5. Por fim, na Seção 6, são destacadas as contribuições deste trabalho e possíveis trabalhos futuros.

2. Conceitos básicos

Na análise de redes sociais, é fundamental compreender um indivíduo de maneira mais profunda. Para isso, podem ser extraídas três principais informações da rede [18]: Topológica, Temporal e Contextual.

A informação topológica, fundamentada na estrutura do grafo que representa a rede, permite identificar como os diferentes nós (indivíduos ou entidades) estão interconectados [19]. Isso revela padrões de interação e a importância relativa de cada nó na rede [20]. Em algumas redes sociais, no entanto, essa topologia não é tão evidente, sendo necessário utilizar ferramentas para identificar as interconexões entre os indivíduos. Um exemplo disso é o Youtube. O algoritmo TROY [21] [16] é uma ferramenta que explicita as interações entre usuários do Youtube. Por meio da análise das respostas a comentários, o algoritmo identifica quem “recebeu” ou para quem foi “enviado” um dado conteúdo textual, gerando, assim, um multigrafo com as interações.

Já a informação temporal, que envolve a análise dos dados ao longo do tempo, foca a cronologia das interações [22]. Entender quando determinadas ações ocorrem pode fornecer insights valiosos sobre o comportamento dos indivíduos e as dinâmicas sociais [20].

A informação contextual considera o ambiente social e cultural, além das intenções nas comunicações [14]. Embora seja relevante, frequentemente

2 Periculosidade é uma expressão que refere-se à qualidade de algo que apresenta risco ou perigo. No contexto atual, pessoas e/ou palavras suspeitas de acordo com um domínio podem ser qualificadas quanto ao seu nível de perigo.

3 Método que busca identificar pessoas suspeitas de crimes em redes sociais por meio de conteúdos textuais. Para isso, é utilizado um vocabulário controlado composto por termos de acordo com domínio da aplicação (e.g. pedofilia, etc.). Nesse método, esses termos são ponderados e normalizados conforme o nível de periculosidade no domínio em questão. E, posteriormente, as pessoas são ponderadas de acordo com a utilização dos termos pertencentes a esse vocabulário em seus textos.

aparece como dados não estruturados como mensagens e comentários, que são difíceis de analisar [23] [24]. Técnicas como Mineração de Texto e Anotação Semântica ajudam a transformar esses dados em conhecimento acionável, permitindo uma análise mais profunda das redes sociais e interações humanas [25] [14].

A mineração de texto é uma técnica poderosa que permite extrair conhecimento útil a partir de grandes volumes de dados textuais, utilizando uma variedade de recursos e abordagens [26]. Essa extração é realizada por meio de ferramentas e técnicas computacionais que tornam possível identificar padrões, tendências e informações relevantes em textos [27]. Entre as diversas metodologias utilizadas na mineração de texto, destacam-se técnicas de *Machine Learning*, que permitem a modelagem e previsão de comportamentos a partir de dados; e análises estatísticas, que ajudam a quantificar e interpretar informações; e o modelo Bag-of-Words, que representa documentos como conjuntos de palavras, facilitando a análise textual de maneira simplificada [28].

Já a anotação semântica de textos utiliza recursos que vão além da simples análise textual, incorporando elementos semânticos que enriquecem a compreensão do conteúdo [29]. Entre os recursos disponíveis, destaca-se o Vocabulário Controlado, também conhecido como Tesauro, que é composto por uma lista estruturada de termos e expressões que descrevem um determinado domínio de conhecimento e tem a função de organizar e padronizar a terminologia utilizada, facilitando a busca e a recuperação de informações específicas [30].

Em comparação, as ontologias oferecem uma abordagem mais rica e complexa, pois não apenas definem termos, mas também estabelecem hierarquias e relacionamentos entre os conceitos, permitindo uma representação dinâmica e interconectada do conhecimento, o que facilita a compreensão das relações entre os termos e promove uma análise mais aprofundada dos dados [31]. Tanto a mineração de texto quanto a anotação semântica são essenciais na extração e organização do conhecimento a partir de informações

textuais, contribuindo significativamente para a análise de dados em várias áreas.

3. Trabalhos relacionados

Nesta seção, serão apresentados alguns trabalhos que utilizam um vocabulário controlado ou conjunto de termos para possibilitar análise contextual de dados textuais da rede (e.g. mensagens, comentários, entre outros), a fim de identificar diferentes tipos de pessoas suspeitas de crimes em redes sociais (e.g. pedofilia, assédio e cyberbullying).

Bretschneider et al. [12] desenvolveram um método que busca identificar mensagens de assédio online. Esse método faz uso de um conjunto pré-definido de palavras que podem ser classificadas como de alta periculosidade no domínio em questão, para apoiar a identificação de mensagens com teor suspeito. Sendo assim, a partir desse conjunto, são verificadas as mensagens que se enquadram em padrões textuais. Esses padrões avaliam a conexão entre uma pessoa (e.g. pronomes pessoais, nomes de usuários, entre outros) e uma palavra suspeita (ou profana) pertencente ao conjunto pré-definido. Dessa maneira, mensagens que se enquadram nesses padrões são marcadas como de assédio. Por outro lado, Bretschneider e Peters [11], na busca de pessoas que praticam cyberbullying utilizam o mesmo método proposto por Bretschneider et al. [12]. Mas Bretschneider e Peters [11] enriquecem o método com a análise topológica por considerarem o comportamento relacional das pessoas. Desse modo, pessoas são consideradas suspeitas caso tenham enviado um certo número de mensagens com teor suspeito para uma mesma pessoa.

Elzinga et al. [17] desenvolveram um método não automatizado que utiliza um sistema semântico relacional temporal para analisar conversas com teores pedófilos em salas de bate-papo ao longo do tempo. Para isso, Elzinga et al. [17] criaram 6 (seis) categorias em que uma mensagem pode ser classificada: Onde, Quando, Partes Íntimas, Manipulações Sexuais, Fotos e Câmeras, Elogios. Dessa forma, manualmente, cada mensagem é analisada e verificada em qual categoria

se enquadra. Feito isso, posteriormente, dada uma pessoa com suas mensagens categorizadas e por meio do sistema semântico relacional temporal, é possível visualizar as categorias em que uma pessoa percorre na rede ao longo do tempo, bem como o seu comportamento suspeito.

Os trabalhos apresentados consideram um conjunto de palavras em que todas são classificadas como perigosas e não diferenciam o grau de periculosidade. No entanto, nesse conjunto, há termos que são comumente usados por pessoas que não praticam nenhum tipo de crime em redes sociais e há também termos que são mais incomuns e que podem levantar mais suspeitas. Em Elzinga et al. [17], por exemplo, que abordam o domínio de pedofilia, o grupo de palavras da categoria “Partes Íntimas” (ex. pênis, seios, entre outros) pode ser considerado mais perigoso do que o grupo da categoria “Onde” (ex. praia, cinema, entre outras).

4. O método inspection e suas etapas

Esta seção apresenta um breve resumo do método INSPECTION, originalmente proposto e ilustrado em [14]. Este método requer como entrada um conjunto de dados $N_{v_n} = [M, U]$, em que M é um conjunto de mensagens enviadas e/ou recebidas por pessoas de um conjunto U , e é composto por 5 (cinco) etapas: Preparação de Dados, Representação da Rede, Ponderação do Vocabulário Controlado, Análise Contextual e Identificação de Pessoas Suspeitas. As próximas subseções sumarizam essas etapas.

4.1 Preparação de dados

Nesta etapa, são utilizadas técnicas de mineração de texto com o objetivo de, para cada mensagem $m_x \in M$, normalizar cada termo t_j existente em m_x . Para isso, essa etapa é composta por 3 (três) subetapas: *Normalização e Extração de Conteúdo Textual*, *Remoção de Stop Words* e *Stemming*. Na subetapa de *Normalização e Extração de Conteúdo Textual*, devido à informalidade existente na escrita em redes sociais, busca-se remover letras repetidas, tratar abreviaturas, entre outros.

Já as subetapas *Remoção de Stop Words* e *Stemming* são responsáveis, respectivamente, por remover palavras $t_j \in m_x$ com pouco significado e identificar o radical dos termos. Ao final, é gerado o conjunto de mensagens tratadas M' .

4.2 Representação da rede

Na etapa de Representação da Rede, dois multigrafos são construídos a partir de M' a fim de representar a rede de duas formas. Na primeira, são representadas as pessoas e suas mensagens. Para isso, é utilizado um multigrafo homogêneo dirigido $G_{pp}(V_{pp}, E_{pp})$, em que cada $v_{pp} \in V_{pp}$ representa uma pessoa e cada $e_{pp} \in E_{pp}$ representa uma mensagem, a qual permite identificar a pessoa que enviou e/ou recebeu essa mensagem. Além disso, cada e_{pp} tem um atributo T , responsável por armazenar o conteúdo textual de uma mensagem $m_x \in M$. Já na segunda forma de representação da rede, por meio de um multigrafo heterogêneo dirigido, $G_{pt}(V_p \cup V_T, E_{pt} \cup E_{Tp})$, são representadas as Pessoas e os Termos utilizados em mensagens. Nesse caso, os vértices V_p e V_T , respectivamente, representam as pessoas e os termos utilizados em mensagens ($t_j \in m_x$). Já as arestas dirigidas E_{pt} e E_{Tp} são responsáveis por informar, respectivamente, a pessoa que enviou e a pessoa que recebeu um determinado termo.

4.3 Ponderação do vocabulário controlado

Esta subetapa utiliza um vocabulário controlado $O = [C, R]$ de acordo com o domínio da aplicação (e.g. Terrorismo, Pedofilia, Bullying, entre outros). Esse vocabulário é composto por um conjunto de termos C e um conjunto de relações entre termos R . O conjunto de termos divide-se em dois subconjuntos disjuntos, ie, $C = [C_r, C_s]$, em que C_r tem termos mais genéricos (denominados classes raízes) e C_s contém termos específicos (chamados de subclasses). Sabendo-se que cada classe apresenta um atributo w , responsável por armazenar o peso da classe, o vocabulário é ponderado em duas fases. Na primeira fase, conta-se com o apoio de um especialista, no domínio em questão, para ponderar as classes raízes ($c_r \in C_r$).

Uma vez ponderadas as classes raízes, a segunda fase busca ponderar as subclasses ($c_s \in C_s$). Essas subclasses passam pelas subetapas *Normalização e Extração de Conteúdo Textual e Stemming* da etapa de *Preparação de Dados* da mesma forma como descrito anteriormente para os termos das mensagens. Ao final dessa fase, é gerado um conjunto de subclasses processadas denominado C'_s . Com as subclasses tratadas ($c'_s \in C'_s$), são verificadas quais delas estão presentes na rede a ser analisada. Para tanto, é aplicada um filtro por meio da seguinte operação $A = C'_s \cap V_T$. Em seguida, é calculado o peso global ($GW_{t'_j}$), para cada $t'_j \in A$ (Eq. 1).

$$GW_{t'_j} = \log 2 \left(\frac{|E_{pp}|}{|n'_{t'_j}|} \right) \quad (1)$$

Na equação 1, $|E_{pp}|$ e $|n'_{t'_j}|$ indicam, respectivamente, o número total de arestas (ou número de mensagens) em G_{pp} e o número de arestas em E_{pp} que tenham o termo t'_j em mensagens (ie, $n'_{t'_j} = \{e_{ppi} | t'_j \in e_{ppi}.T\}$). Desse modo, o peso global $GW_{t'_j}$, é responsável por expressar a raridade de cada termo.

Identificada a raridade de cada termo, ela deverá ser normalizada de acordo com a classe raiz, a qual o respectivo termo está vinculado. Desse modo, é possível diferenciar o nível de periculosidade de cada termo. Para isso, é calculado HGW ($HGW = \log 2 \left(\frac{|E_{pp}|}{1} \right)$), uma vez que a normalização é dada de acordo com o peso global máximo. Em seguida, é verificada a representatividade em termos percentuais do termo t'_j por meio de $GW_{t'_j}^{\%}$ (Eq. 2).

$$GW_{t'_j}^{\%} = \frac{GW_{t'_j}}{HGW} \quad (2)$$

Os valores dessa representatividade são utilizados para calcular o peso do termo normalizado. Tendo-se esses valores, é utilizada $GW_{t'_j}^N$ (Eq. 3) para obter o Peso Global final para cada termo, dentro do intervalo da sua categoria.

$$GW_{t'_j}^N = \left((\text{Max}(C_{r_k}) - \text{Min}(C_{r_k})) \times GW_{t'_j}^{\%} \right) + \text{Min}(C_{r_k}) \quad (3)$$

Para isso, é calculado o intervalo para cada c_r , ($\text{Max}(C_{r_j}) = C_{r_j}.w$ e o $\text{Min}(C_{r_j}) = \text{Max}(\{C_{r_i}.w | C_{r_i} \in C_r - \{C_{r_j}\} \wedge C_{r_i}.w < C_{r_j}.w\} \cup \{0\})$. Tendo-se o valor obtido por meio de $GW_{t'_j}^N$ e sabendo-se que $t'_j = C'_s$, esse valor é atribuído ao atributo w da subclasse do termo correspondente (ie, $c'_s.w = GW_{t'_j}^N$).

4.4 Análise contextual

Esta etapa busca identificar um *score* para cada pessoa na rede, a fim de representar o seu grau de suspeição no contexto do domínio da aplicação. Para isso, para cada pessoa são resgatados todos os termos utilizados por ela $C_{v_T}(v_p)$, onde $C_{v_T}(v_p) = \{v_T | \exists(v_p, v_T) \in E_{PT}\}$. Todavia, nesse resgate, podem existir termos que não são suspeitos, ou seja, não são considerados importantes no domínio da aplicação. Para isso, aplica-se um filtro $C_{v_T}^n(v_p)$, em que $C_{v_T}^n(v_p) = C_{v_T}(v_p) \cap C'_s$, com o objetivo de obter apenas os termos suspeitos utilizados pela pessoa

Para cada pessoa v_p que tenha utilizado termos suspeitos (ie, $C_{v_T}^n(v_p) | (v_p) | > 0$), são utilizadas as métricas M_{GW} e M_{FGW} . A métrica M_{GW} , por meio da Equação 4, realiza a soma de todos os pesos globais normalizados dos termos suspeitos utilizados por uma pessoa. Sendo assim, essa métrica, apresenta a soma da raridade de cada termo suspeito, normalizado pelo peso de uma classe raiz a qual esse termo esteja ligado.

$$M_{GW}(v_p) = \sum_{C_{s_i} \in C_{v_T}^n(v_p)} C_{s_i}.w \quad (4)$$

Já na métrica M_{FGW} , a frequência de cada termo suspeito utilizado por uma pessoa é considerada. Sendo assim, essa frequência é multiplicada pelo o seu respectivo peso global normalizado, indicando a importância desse termo para uma pessoa com relação a todas as mensagens analisadas. Posteriormente, os valores obtidos são somados. Para isso, utiliza-se a Equação 5.

$$M_{FGW}(v_p) = \sum_{C_{s_i} \in C_{v_T}^n(v_p)} W(v_p, C_{s_i}) \times C_{s_i}.w \quad (5)$$

Dessa maneira, $W(v_p, C_{s_i})$ resgata a frequência do uso de um determinado termo suspeito utilizado por uma pessoa. Formalmente, $W(v_p, C_{s_i}) = |\{(o, t) \in E_{PT}/o = v_p \text{ e } t = C_{s_i}\}|$. Com isso, selecionada uma das métricas, o *score* obtido com ela é aplicado à pessoa analisada ($v_p.st = M_{GW}(v_p)$ ou $v_p.st = M_{FGW}(v_p)$), expressando numericamente o comportamento suspeito dela.

4.5 Identificação de suspeitos

Nesta última etapa, é feita uma ordenação decrescente pelos *scores* obtidos com cada uma das métricas acima, de tal forma que aquelas pessoas mais suspeitas se encontram no topo da lista.

5. Experimentos e resultados

Esta seção apresenta o conjunto de dados utilizados e reporta os experimentos realizados com o objetivo de responder às questões de pesquisa apresentadas na Seção 1. A escolha do tema pedofilia deveu-se ao fato de as redes sociais terem se tornado um grande atrativo para crianças e adolescentes, fazendo com que esse público tenha participação assídua nesses ambientes [32]. Por isso, é comum que pedófilos utilizem as redes para identificar potenciais vítimas [4].

Em relação ao protótipo do método INSPECTION [14], ele foi desenvolvido em Python 3.0. Na etapa de preparação dos dados, foram utilizadas as bibliotecas NLTK [33], Spacy [34], entre outras. Além disso, foi criado um dicionário de gírias e abreviaturas, comumente usadas em redes sociais em português, para tratar possíveis ruídos no texto. A construção desse dicionário foi feita por meio de pesquisas em sites relacionados [35] [36] [37]. As próximas seções apresentam os detalhes dos experimentos.

Nas próximas subseções, serão apresentados detalhes dos conjuntos de dados (subseção 5.1) e vocabulários controlados (subseção 5.2) utilizados nos experimentos.

5.1 Conjunto de Dados

Nos experimentos aqui realizados, cinco conjuntos de dados foram aplicados ao método INSPECTION. Tais conjuntos foram construídos a partir de comentários e respostas em português extraídos de cinco vídeos do Youtube, de um canal pertencente a uma cantora menor de idade. A escolha dos vídeos, bem como do canal informado, deve-se ao fato de terem uma maior propensão de conter conteúdos textuais suspeitos no tema escolhido para os experimentos. A Tabela 1 apresenta dados estatísticos dos 5 (cinco) vídeos.

Tabela 1 - Dados Estatísticos de cada vídeo v_n utilizado nos experimentos.

| Vídeo | Duração | Visualizações | Comentários e Respostas |
|-------|---------|---------------|-------------------------|
| v_1 | 2M:38S | 2.551.258 | 6.897 |
| v_2 | 3M:14S | 57.083 | 348 |
| v_3 | 2M:53S | 13.041.367 | 13.080 |
| v_4 | 2M:56S | 18.157.216 | 18.548 |
| v_5 | 4M:04S | 89.593.403 | 71.387 |

Conforme mencionado na Seção 4, o INSPECTION requer como entrada um conjunto de dados $N_{v_n} = [M, U]$. Assim, cada um dos vídeos listados na Tabela 1 foi submetido ao Algoritmo TROY, permitindo a extração das interações entre as pessoas; detalhes desse algoritmo

podem ser vistos em [21] e [16]. Esses dados resultantes foram utilizados nos experimentos apresentados neste trabalho e estão resumidos na Tabela 2. O processo de construção desses conjuntos contou ainda com uma etapa de enriquecimento dos dados responsável por incorporar

informações sobre suspeitos de pedofilia existentes no conjunto de dados PAN-2012-BR [39] [7]. O PAN-2012-BR é um conjunto de dados que contém conversas de 39 (trinta e nove) pedófilos, as quais foram disponibilizadas pelo

Ministério Público Federal de São Paulo (MPF-SP). A integração desses suspeitos aos conjuntos de dados da Tabela 2 foi feita por meio da tarefa de predição de links, conforme descrito detalhadamente em [16].

Tabela 2 - Dados estatísticos dos conjuntos de dados gerados a partir dos vídeos da Tabela 1.

| Vídeo | N_{v_n} | | Média de Interações | U Suspeitas | M Suspeitas |
|-------|-----------|--------|---------------------|-----------------|-----------------|
| | U | M | | | |
| v_1 | 1.806 | 10.647 | 3 | 39 | 1.752 |
| v_2 | 87 | 382 | 2 | 20 | 132 |
| v_3 | 3.688 | 16.332 | 3 | 39 | 1.484 |
| v_4 | 5.255 | 18.488 | 3 | 39 | 1.694 |
| v_5 | 18.802 | 75.249 | 3 | 39 | 1.280 |

5.2 Vocabulário Controlado

O vocabulário controlado foi construído tomando como base seis categorias de palavras, inspiradas em [17]: “onde”, “quando”, “partes íntimas”, “manipulações sexuais”, “fotos e câmera” e “elogios”. Cada categoria tornou-se uma classe raiz a partir da qual foram adicionadas subclasses extraídas de vocabulários encontrados na literatura (vide Tabela 3). Essas classes e suas subclasses passaram a formar um único vocabulário denominado *O*. Além dessas classes raízes, foi considerada ainda a classe raiz roupa. Assim, para os experimentos com o método INSPECTION foram adotadas 4 (quatro) variações desse vocabulário, como em [16]: O_1^{INT} (sem a classe raiz roupa e ponderado com números inteiros), O_2^{INT} (com a classe raiz roupa e ponderado com números inteiros), O_1^{REAL} (sem a classe raiz roupa e ponderado com números

reais) e O_2^{REAL} (com a classe raiz roupa e ponderado com números reais).

É importante ressaltar que, nos vocabulários e , a classe raiz “roupa” é considerada, pois é comum que pessoas suspeitas de pedofilia perguntem sobre as vestimentas de suas possíveis vítimas. Ademais, isso permite a avaliação do desempenho do método com o vocabulário controlado enriquecido por essa classe, tanto com ponderação quanto sem. Além disso, possibilita a comparação do método ponderado de maneira mais rigorosa (*INT*) e mais flexível (*FLOAT*) em relação ao vocabulário não ponderado.

Na Tabela 3, são apresentadas as ponderações das classes mais genéricas dos vocabulários. É válido ressaltar que, para a ponderação do vocabulário controlado, houve o apoio de um policial federal de Aracaju/SE que trabalha com o tema da pedofilia há 11 (onze) anos.

Tabela 3 - Ponderações dos vocabulários controlados e origens das subclasses.

| C_r | O_1^{INT} | O_2^{INT} | O_1^{REAL} | O_2^{REAL} | C_s |
|----------------------|-------------|-------------|--------------|--------------|-------|
| | Peso (w) | Peso (w) | Peso (w) | Peso (w) | |
| Quando | 1 | 1 | 1.5 | 1.5 | [40] |
| Onde | 2 | 2 | 2.3 | 2.3 | [41] |
| Elogios | 3 | 3 | 4.0 | 4.0 | [42] |
| Fotos e Câmera | 4 | 5 | 6.0 | 6.0 | [43] |
| Partes Íntimas | 5 | 6 | 5.7 | 5.7 | [44] |
| Manipulações Sexuais | 6 | 7 | 5.5 | 5.5 | [45] |
| Roupa | - | 4 | - | 5.0 | [46] |

Para os experimentos com o INSPECTION sem a ponderação do vocabulário controlado, todos os termos receberam peso 1 (um) (ie, $C_s'.w = 1$). Com isso, não houve diferenciação no nível de periculosidade dos termos. Dessa maneira, criou-se um referencial para permitir a comparação com os resultados gerados com o INSPECTION a partir da diferenciação do nível de periculosidade dos termos em função da ponderação do vocabulário controlado.

5.3 Resultados

Considerando as variações em relação aos conjuntos de dados, aos vocabulários e suas ponderações, assim como as métricas contextuais, ao todo, o método INSPECTION foi executado 60 (sessenta) vezes. Os resultados dessas execuções encontram-se resumidos

na Tabela 4. Para avaliar o desempenho do método INSPECTION, a medida utilizada foi a *AUC* (Área sob a Curva) [47]. Essa medida calcula a probabilidade de um suspeito ter um *score* superior a um não suspeito, ambos escolhidos n vezes de maneira aleatória. Neste trabalho, n é igual a 100. É válido ressaltar que o método INSPECTION utiliza o rótulo das pessoas (suspeita e não suspeita) apenas para avaliar o desempenho do método.

Em uma análise geral do método INSPECTION [14] com e sem a ponderação do vocabulário, observa-se que todas as execuções do método levaram a resultados superiores ao preditor randômico ($AUC > 0,5$), o que sinaliza para uma boa capacidade do método em identificar suspeitos de pedofilia, independente do uso ou não de ponderação.

Tabela 4 - Resultados dos experimentos.

| Vídeo | VC | INSPECTION C/ PONDERAÇÃO | | INSPECTION S/ PONDERAÇÃO | |
|-------|--------------|--------------------------|----------|--------------------------|----------|
| | | M_{FGW} | M_{GW} | M_{FGW} | M_{GW} |
| v_1 | O_1^{INT} | 0,905 | 0,905 | 0,900 | 0,865 |
| | O_2^{INT} | 0,885 | 0,890 | | |
| | O_1^{REAL} | 0,910 | 0,890 | 0,910 | 0,835 |
| | O_2^{REAL} | 0,915 | 0,865 | | |

| Vídeo | VC | INSPECTION C/ PONDERAÇÃO | | INSPECTION S/ PONDERAÇÃO | |
|-------|--------------|-----------------------------|----------|-----------------------------|----------|
| | | M_{FGW} | M_{GW} | M_{FGW} | M_{GW} |
| v_2 | O_1^{INT} | 0,795 | 0,845 | 0,600 | 0,545 |
| | O_2^{INT} | 0,810 | 0,920 | | |
| | O_1^{REAL} | 0,835 | 0,835 | 0,535 | 0,525 |
| | O_2^{REAL} | 0,840 | 0,920 | | |
| v_3 | O_1^{INT} | 0,930 | 0,905 | 0,900 | 0,895 |
| | O_2^{INT} | 0,930 | 0,890 | | |
| | O_1^{REAL} | 0,900 | 0,915 | 0,855 | 0,840 |
| | O_2^{REAL} | 0,930 | 0,925 | | |
| v_4 | O_1^{INT} | 0,940 | 0,930 | 0,910 | 0,885 |
| | O_2^{INT} | 0,950 | 0,965 | | |
| | O_1^{REAL} | 0,945 | 0,950 | 0,945 | 0,915 |
| | O_2^{REAL} | 0,930 | 0,950 | | |
| v_5 | O_1^{INT} | 0,940 | 0,885 | 0,905 | 0,885 |
| | O_2^{INT} | 0,925 | 0,950 | | |
| | O_1^{REAL} | 0,930 | 0,925 | 0,925 | 0,900 |
| | O_2^{REAL} | 0,920 | 0,915 | | |

Em uma análise mais detalhada, das 40 (quarenta) comparações de desempenho entre o método INSPECTION com e sem ponderação do vocabulário, o método ponderado obteve vitória em 33 (trinta e três casos) (82,5%), empatou em 3 (três) (7,5%, destacados em negrito e azul na Tabela 4) e perdeu em 4 (quatro) (10%, destacados em vermelho e itálico na Tabela 4). Esses resultados sugerem uma resposta positiva à questão de pesquisa deste artigo, que investiga se a ponderação do vocabulário (relativa ao nível de periculosidade dos termos) pode contribuir para aprimorar a identificação de suspeitos de crimes em redes sociais, especificamente no contexto da pedofilia.

Detalhando ainda mais os resultados do método INSPECTION com a ponderação do vocabulário, observa-se que os melhores desempenhos foram alcançados com o vocabulário O_1^{INT} , o qual obteve

sucesso em todos os 5 (cinco) conjuntos de dados, empatando apenas no conjunto de dados v_3 com a métrica M_{GW} . Isso mostra que o enriquecimento do vocabulário com novas classes raízes deve ser feito cuidadosamente. E ainda, que a ponderação das classes raízes de forma mais rígida proporcionou melhores resultados. Já em relação às métricas, a M_{GW} resultou em melhores resultados (dezoito de vinte comparações – 90%). Com isso, a frequência em que a pessoa usou termos suspeitos não é tão relevante.

Em suma, a partir dos resultados apresentados, pode-se perceber que ao ponderar o vocabulário controlado é possível obter melhores resultados no que tange à identificação de pessoas suspeitas de crimes de pedofilia. Em outras palavras, o impacto da ponderação dos termos mostrou-se positivo no processo.

6. Considerações Finais

As redes sociais têm estado presentes cada vez mais no dia a dia da sociedade, atraindo os mais diferentes públicos com as mais diferentes particularidades. Dessa forma, vêm se tornando um meio propício para que pessoas com más intenções pratiquem atos ilícitos na rede. Assim, para evitar riscos à integridade física e psicológica de indivíduos nas redes sociais, a identificação de pessoas suspeitas tem tido grande destaque.

Na literatura, muitos métodos que buscam identificar pessoas suspeitas de crimes em redes sociais utilizam um vocabulário ou conjunto de termos de acordo com o domínio da aplicação. Desse modo, torna-se possível analisar os dados textuais disponibilizados por uma pessoa nas redes sociais a fim de verificar o quanto ela pode ser suspeita. Contudo, dentro de um domínio de aplicação, podem existir termos com diferentes níveis de periculosidade. Diante disso, neste trabalho, foram levantadas as seguintes questões de pesquisa: *Qual o impacto da diferenciação dos níveis de periculosidade dos termos suspeitos de um vocabulário ou*

conjunto de termos? Se tal diferenciação pode levar a melhores resultados na identificação de pessoas suspeitas de crimes em redes sociais.

Com a finalidade de responder aos questionamentos acima, foram feitos experimentos com o método INSPECTION, em 5 (cinco) conjuntos de dados, sem e com a ponderação do vocabulário controlado. Os resultados obtidos por meio dos experimentos no domínio da pedofilia mostraram que o impacto da ponderação do vocabulário controlado é positivo e, conseqüentemente, leva a melhores resultados (82.5% dos experimentos realizados neste trabalho). Dessa maneira, a diferenciação dos níveis de periculosidade dos termos em recursos semânticos (e.g. vocabulários controlados, conjunto de termos, entre outros), para identificação de pessoas suspeitas de crimes em redes sociais, é altamente relevante.

Como trabalhos futuros, destacam-se: a ponderação do vocabulário controlado sem depender do auxílio de um especialista no domínio da aplicação e a realização de experimentos em outras redes sociais e domínios.

Referências

- [1] SILVA, C. R. M.; TESSAROLO, F. M. 2016. Influenciadores digitais e as redes sociais enquanto plataformas de mídia. In: Congresso Brasileiro de Ciências da Comunicação, 39., 2016, São Paulo. *Anais [...]*. São Paulo: Intercom, 2016.
- [2] BENEVENUTO, F.; ALMEIDA, J. M.; SILVA, A. S. *Explorando redes sociais online: da coleta e análise de grandes bases de dados às aplicações*. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Computação, 2011.
- [3] TAKHTEYEV, Y.; GRUZD, A.; WELLMAN, B. Geography of Twitter networks. *Social networks*, Amsterdam, n. 34, v. 1, 73-81, 2012.
- [4] DAS, B.; SAHOO, J. S. Social networking sites – a critical analysis of its impact on personal and social life. *International Journal of Business and Social Science*, United States of America, v. 2, n. 14, p. 222-228, 2011.
- [5] LÉVY, P.; FEROLDI, D. *Cybercultura: gli usi sociali delle nuove tecnologie*. ITÁLIA: Feltrinelli, 1999.
- [6] Andressa Olivetti Costa. 2019. *Ciberterrorismo*. 2019. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Direito) – Centro Universitário Antônio Eufrásio de Toledo de Presidente Prudente, Presidente Prudente, 2019.
- [7] SANTOS, L. F.; GUEDES, G. Identificação de predadores sexuais brasileiros em conversas textuais na internet por meio de aprendizagem de máquina. *iSys-Brazilian Journal of Information Systems*, Rio de Janeiro, v. 13, n. 4, p. 22-47, 2020.
- [8] LEI, Y.; HUANG, B. Prediction of Criminal Suspect Characteristics with Application of Wavelet Neural Networks. *Applied Mathematics and Nonlinear Sciences*, Boston, 2023.
- [9] MANN, B. L. Social networking websites—a concatenation of impersonation, denigration, sexual aggressive solicitation, cyber-bullying or happy slapping videos. *International Journal of Law and Information Technology*, Oxford, v. 17, v. 3, p. 252-267, 2009.
- [10] SINGH, M.; SINGH, A. How Safe You Are on Social Networks? *Cybernetics and Systems*, Oxford, v. 54, n. 7, p. 1154-1171, 2023.

- [11] BRETSCHNEIDER, U.; PETERS, R. Detecting cyberbullying in online communities. *In: European Conference on Information Systems*, 24., Istanbul, 2016. *Anais [...]*. Istanbul, 2014.
- [12] BRETSCHNEIDER, U.; WÖHNER, T.; PETERS, R. Detecting Online Harassment in Social Networks. *In: International Conference on Information Systems*, 35., Auckland, 2014. *Anais [...]*. Auckland, 2014.
- [13] FLORENTINO, E. S.; GOLDSCHMIDT, R. R.; CAVALCANTI, M. C. R. Exploring Interactions in YouTube to Support the Identification of Crime Suspects. *In: Anais do Simpósio Brasileiro de Sistemas de Informação*, 17., Uberlândia, 2021. *Anais [...]*. Uberlândia: SBC, 2021.
- [14] FLORENTINO, E. S.; GOLDSCHMIDT, R. R.; CAVALCANTI, M. C. R. Identifying Suspects on Social Networks: An Approach based on Non-structured and Nonlabeled Data. *In: Proceedings of the International Conference on Enterprise Information Systems*, 23., 2021, Setúbal. *Anais [...]*. Setúbal: ICEIS, 2021. Disponível em: <https://www.scitepress.org/Link.aspx?doi=10.5220/0010440300510062>. Acesso em: 22 abr. 2025.
- [15] FLORENTINO, E. S.; GOLDSCHMIDT, R. R.; CAVALCANTI, M. C. Identifying Criminal Suspects on Social Networks: A Vocabulary-Based Method. *In: Proceedings of the Brazilian Symposium on Multimedia and the Web*, 20., 2020, São Luís. *Anais [...]*. São Luís: SIGWEB, 2020.
- [16] FLORENTINO, E. S.; GOLDSCHMIDT, R. R.; CAVALCANTI, M. C. Identificando Suspeitos de Crimes por meio de Interações Implícitas no YouTube. *iSys - Revista Brasileira de Sistemas de Informação*, Rio de Janeiro, v. 15, n. 1, p. :36, 2022.
- [17] ELZINGA, P.; WOLFF, K. E.; POELMANS, J. Analyzing chat conversations of pedophiles with temporal relational semantic systems. *European Intelligence and Security Informatics Conference*, [s. l.], 2012, p. 242-249.
- [18] MUNIZ, C. P. M. T. *Investigando a utilização de atributos temporais no problema de predição de links*. 2016. Dissertação (Mestrado em Ciências em Sistemas e Computação) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2016.
- [19] CHEN, Y.; COSKUNUZER, B.; GEL, Y. Topological relational learning on graphs. *Advances in neural information processing systems*, Cambridge, v. 34, p. 27029-27042, 2021.
- [20] MUNIZ, C. P.; GOLDSCHMIDT, R.; CHOREN, R. Combining contextual, temporal and topological information for unsupervised link prediction in social networks. *Knowledge-Based Systems*, Amsterdam, v. 156, p. 129-137, 2018.
- [21] FLORENTINO, E.S.; GOLDSCHMIDT, R. R.; CAVALCANTI, M. C. R. Exploring Interactions in YouTube to Support the Identification of Crime Suspects. *In: Anais do Simpósio Brasileiro de Sistemas de Informação*, 17., Uberlândia, 2021. *Anais [...]*. Uberlândia: SBC, 2021.
- [22] FLORENTINO, E. S.; CAVALCANTE, A. A. B.; GOLDSCHMIDT, R. R. An edge creation history retrieval based method to predict links in social networks. *Knowledge-Based Systems*, Amsterdam, v. 205, p. 106268, 2020.
- [23] BAARS, H.; KEMPER, H-G. Management support with structured and unstructured data—an integrated business intelligence framework. *Information Systems Management*, Abingdon, v. 25, n. 2, p. 132-148, 2008.
- [24] BERRY, M. W. *Automatic discovery of similar words. Survey of Text Mining: Clustering, Classification and Retrieval*. New York: Springer Verlag, 2004.
- [25] CARVALHO, R. C. *Aplicação de técnicas de mineração de texto na recuperação de informação clínica em prontuário eletrônico do paciente*. 2017. Dissertação (Mestrado em Ciência da Informação) – Universidade Estadual Paulista, Marília, 2017.
- [26] SULOVA, S. Text mining approach for identifying research trends. *In: International Conference on Computer Systems and Technologies*, 21., 2021, Ruse. *Anais [...]*. Ruse: University of Ruse, 2021.
- [27] MORAIS, E. A. M.; AMBRÓSIO, A. P. L. *Mineração de textos. Relatório Técnico*—Instituto de Informática. Goiás: Instituto de Informática Universidade Federal de Goiás, 2007.
- [28] TAN, A-H. et al. 1999. Text mining: The state of the art and the challenges. *Proceedings of the PAKDD*, 1999.
- [29] OLIVEIRA, H. C.; CARVALHO, C. L. *Gestão e representação do conhecimento*. Goiás: UFG, 2008.
- [30] SALES, R.; CAFÉ, L. Diferenças entre tesouros e ontologias. *Perspectivas em Ciência da Informação*, Belo Horizonte, v. 14, n. 1, p. 99-116, 2009.
- [31] CHANDRASEKARAN, B.; JOSEPHSON, J. R.; BENJAMINS, V. R. What are ontologies, and why do we need them? *IEEE Intelligent Systems and their applications*, Piscataway, v. 14, n. 1, p. 20-26, 1999.
- [32] FERNÁNDEZ, A. Clinical Report: The impact of social media on children, adolescents and families. *Archivos de Pediatría del Uruguay*, v. 82, n. 1, p. 31-32, 2011.
- [33] BIRD, S.; KLEIN, E.; LOPER, E. *Natural language processing with Python: analyzing text with the natural language toolkit*. Sebastopol, na Califórnia. Sebastopol: O'Reilly Media, 2009.

- [34] HONNIBAL, M. *et al.* *spaCy*: Industrial-strength Natural Language Processing in Python. Disponível em: <https://zenodo.org/records/10009823>. Acesso em: 22 abr. 2025.
- [35] Por Da Redação. 2014. SQN, LOL? Entenda as principais expressões e hashtags das redes sociais. *Aconteceu no Vale*. [s. l.], 15 fev. 2014. Disponível em: https://aconteceunovale.com.br/portal/?p=21357#google_vignette. Acesso em: 19 maio 2025.
- [36] thecoolcapybara List of internet slangs - gírias da internet. *Reddit*. 20 maio 2020. Disponível em: https://www.reddit.com/r/Portuguese/comments/gn8sly/list_of_internet_slangs_g%C3%ADrias_da_internet/. Acesso em: 22 abr. 2025.
- [37] VEJA lista de abreviações usadas pelos jovens em troca de mensagens na internet. *Gshow*. [s. l.], 30 jun. 2021. Disponível em: <https://gshow.globo.com/programas/mais-voce/noticia/veja-lista-de-abreviacoes-usadas-pelos-jovens-em-troca-de-mensagens-na-internet.ghml>. Acesso em: 22 abr. 2025.
- [38] Ligga Telecom. Gírias nos games e seus significados: quais as mais usadas. <https://liggavc.com.br/blog/entretenimento/glossario-conheca-as-girias-mais-usadas-na-internet-e-nos-games/>.
- [39] ANDRIJAUSKAS, A.; SHIMABUKURO A; MAIA R. F. 2017. DESENVOLVIMENTO DE BASE DE DADOS EM LÍNGUA PORTUGUESA SOBRE CRIMES SEXUAIS. In: Simpósio de Iniciação Científica, Didática e Ações Sociais da FEI, 7., 2017. Anais [...]. [s. l.], 2017.
- [40] Scheider, Simon, and Peter Kiefer. "(Re-) localization of location-based games." *Geogames and geoplay: game-based approaches to the analysis of geo-information*. Cham: Springer International Publishing, 2017. 131-159. SCHEIDER, S.; KIEFER, P. (Re-) Localization of Location-Based Games. In: AHLQVIST, O.; SCHILIEDER, C. (Eds.). *Geogames and Geoplay: Game-based Approaches to the Analysis of Geo-Information*. Berlim: Springer. p. 131-159.
- [41] Jerry R Hobbs and Feng Pan. Time ontology in OWL. *W3C working draft*, Arlington, 2006.
- [42] NEVES, F. Elogios de A a Z. *Dicio Dicionário Online de Português*. [s. l.], [201-?]. Disponível em: <https://www.dicio.com.br/elogios-de-a-a-z/>. Acesso em: 22 abr. 2025.
- [43] MUKHERJEE, S.; JOSHI, S. Sentiment aggregation using ConceptNet ontology. In: MITKOV, R.; PARK, J. C. (Eds.). *Proceedings of the Sixth International Joint Conference on Natural Language Processing*. Nagoya: Nagoya Editora. p. 570-578.
- [44] ROSSE C.; MEJINO, J. L. V. The foundational model of anatomy ontology. In: BURGER, A.; DAVIDSON, D.; BALDOCK, R. *Anatomy Ontologies for Bioinformatics*. Heidelberg: Heidelberg Springer. p. 59-117.
- [45] KRONK C.; TRAN, G. Q.; WU, D. T. Y. Creating a Queer Ontology: The Gender, Sex, and Sexual Orientation (GSSO) Ontology. *Studies in health technology and informatics*, Amsterdam, v. 264, p. 208-212, 2019.
- [46] KUANG Z. *et al.* Integrating multi-level deep learning and concept ontology for large-scale visual recognition. *Pattern Recognition*, Amsterdam, v. 78, p. 198-214, 2018.
- [47] LI S. *et al.* Similarity-based future common neighbors model for link prediction in complex networks. *Scientific reports*, London, v. 8, n. 1, 1-11, 2018.

Estudo de densificação e morfologia de cerâmicas de alumina dopadas com nióbia e sílica processadas com técnica de gradiente funcional

Anderson Alves Mota¹, anderson.alves@ime.eb.br

Alaelson Vieira Gomes¹, alaelson@ime.eb.br

¹ Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ

RESUMO: As cerâmicas avançadas apresentam diversas aplicações, com destaque para a proteção balística. Elas são bastante utilizadas nesse campo em virtude de apresentarem elevada força mecânica e baixo peso. A alumina (Al_2O_3), devido a algumas características, como facilidade de obtenção e baixo custo, representa um dos materiais mais pesquisados e utilizados para essa finalidade de emprego. Entretanto, todo material tem limitações de utilização e nem sempre atende a todos os requisitos impostos pela necessidade de utilização. Diante disso, soluções têm sido pesquisadas no sentido de aumentar a densificação da alumina e melhorar características microestruturais para promover um melhor desempenho balístico. Ainda assim, temos oportunidades de melhoria na pesquisa de materiais como no caso de gradiente funcional, promovendo uma mudança de características gradual no mesmo corpo cerâmico, o que faz com que um mesmo material tenha um comportamento semelhante a um sistema balístico de várias camadas distintas de materiais, com a vantagem de não ter as concentrações de tensão desses materiais compostos. Dessa forma, este trabalho objetiva estudar a densificação de materiais processados a partir da técnica de gradiente funcional e sinterização convencional e observar a característica da microestrutura das camadas e desse gradiente em Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).

PALAVRAS-CHAVE: Cerâmicas Avançadas; Alumina; Nióbia; Sílica; Gradiente Funcional.

ABSTRACT: Advanced Ceramic have several applications, among them we could highlight ballistic protection. This usage is mostly due to its mechanical strength and low weight. Alumina (Al_2O_3), given its characteristics such as easy to obtain and low production cost, represents one of the most researched and used for this purpose of use. However, every material has its own limitation of use, such as low density and bad strength when used without doping. Therefore, solutions have been researched to increase alumina density and improve microstructural to promote better ballistic performance. Even if the homogeneous material get better results, still there is some room for improvement on trying something new. One type of material which has been showing good development is Functionally Graded Materials that could promote a change in characteristics in the same material or that causes a material to behave similar to a ballistic system of several distinct layers, but with the advantage of having no stress concentrators as composites. Thus, this work aims to study the densification of Functionally Graded materials in conventional sintering and to observe microstructure characteristic of the layers in a Scanning Electron Microscope (SEM).

KEYWORDS: Advanced Ceramics; Alumina; Niobium Oxide; Silicon Dioxide; Functionally Graded Materials.

1. Introdução

Materiais cerâmicos têm sido bastante estudados e empregados como proteção balística. O principal motivo é seu conjunto de características, como baixa densidade, baixo custo, alta dureza e durabilidade, que permite a essa classe de material ter um bom desempenho de resistência para uma densidade relativamente baixa, quando comparado a outros materiais que são empregados para essa finalidade. [1-3]

O desenvolvimento de projéteis com diferentes formas e uma grande quantidade de energia tem imposto desafios no desenvolvimento de novos materiais balísticos. Esse avanço causou uma evolução em sistemas avançados de proteção individual balística que demonstraram maiores exigências em requisitos para que os novos sistemas fossem resistentes a danos, apresentassem relativa flexibilidade e peso adequado ao seu emprego, bem como uma capacidade eficiente de absorção de energia. [4]

A avaliação de uma cerâmica para uma dada utilização passa por variados fatores, como a capacidade de dissipar energia, propriedades físicas, tipo de processamento para produção do material e microestrutura. [5]

Em geral, mesmo que o carbetto de silício e o carbetto de boro tenham densidades menores do que a alumina Al_2O_3 , este componente tem sido mais utilizado para a fabricação de materiais balísticos de proteção de veículos em função de ter um processamento mais simples, ser mais barato e ter uma melhor relação custo/benefício. [6]

Idealmente, quando dimensionado um material, ele será responsável por suportar um conjunto de esforços, sejam eles de tração, compressão ou rotação. Diante dessa situação, é raro encontrar algum material que de forma isolada vai garantir uma resposta adequada a todos os tipos de solicitação, principalmente durante um impacto balístico. [7]

Para minimizar essas limitações, um método que se apresenta como eficiente é utilizar dopantes. Estes componentes ajudam a controlar o tamanho de grão da alumina durante a sinterização e, consequentemente, auxiliam no controle de propriedades físicas como densificação e resistência mecânica. [8]

Foi desenvolvido pelo laboratório de materiais cerâmicos do Instituto Militar de Engenharia (IME) o sistema cerâmico à base de alumina (Al_2O_3) adicionada em 4% em peso de nióbia (Nb_2O_5). Um dos maiores ganhos em utilizar esse aditivo nos corpos à base de alumina foi a possibilidade de reduzir a temperatura de sinterização da alumina não aditivada de 1600°C para 1450°C . Essa redução foi obtida conservando as propriedades mecânicas da alumina e habilitando esse sistema para o emprego como um componente cerâmico de blindagem balística. [9-10]

Outro método para minimizar as limitações dos materiais cerâmicos utilizados de forma isolada é a montagem de um sistema de blindagem multicamada formado por uma primeira camada de material cerâmico e outra de um material mais dúctil, como compósitos reforçados com fibras. [11-12]

Mesmo utilizando essa montagem de sistema de blindagem, é de se esperar que o comportamento do material cerâmico seja melhorado. Um outro método para incrementar esse desempenho foi por meio do

proposto por pesquisadores japoneses na década de 80. Esses cientistas precisavam desenvolver um material que formasse uma barreira térmica, pois a parte exterior do material estaria submetida a uma temperatura de aproximadamente 2000 K e a parte interior deveria se conservar em 1000 K. Nesse momento, foi desenvolvida essa classe de material que hoje é conhecida como Material de Gradiente Funcional (MGF). [13]

Um MGF constitui-se de um material de várias camadas em que há uma variação da fração volumétrica dos constituintes em cada camada. Essa variação é planejada de forma intencional para garantir que haja uma mudança progressiva na microestrutura do material ao longo de sua extensão. [14]

Uma das vantagens dos materiais MGF sobre os compósitos é que as junções dos materiais compósitos tendem a concentrar tensão, ponto em que se inicia a maior parte das trincas que geram delaminações. [15]

Porém, deve-se observar que produzir um material com gradiente funcional utilizando o método de prensagem uniaxial a frio e sinterização convencional também pode resultar em materiais com delaminações e outros defeitos que impedem, inclusive, o material de ser sinterizado. [16]

A causa raiz dessas delaminações são as concentrações de tensão em virtude de diferentes comportamentos térmicos dos materiais empregados nas camadas. [17]

Observa-se que a o sistema alumina (Al_2O_3) adicionada em 4% em peso de nióbia (Nb_2O_5) e a mistura de alumina (Al_2O_3) adicionada em 4% em peso de nióbia (Nb_2O_5) e 0,8% em peso de sílica (SiO_2) têm propriedades de densificação muito semelhantes. Contudo, apresentam uma diferença de dureza considerável. [10]

Portanto, a premissa principal deste trabalho é que essas misturas de materiais podem ser utilizadas em um gradiente funcional para a aplicação balística, em que a camada mais dura seria empregada como superfície de impacto e com grandes chances de apresentar uma boa sinterização sem o aparecimento de trincas e laminações.

Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi analisar a sinterização de corpos cerâmicos com gradiente funcional à base de alumina, 4% em peso de nióbia (Nb_2O_5) e variando a quantidade de sílica nas composições de 0,04 e 0,8%, quanto à sua densifica-

ção, ao aparecimento de trincas, às delaminações e à morfologia do material.

2. Materiais e Metodologia

2.1. Materiais de partida

Os materiais empregados na produção das amostras foram: Nb_2O_5 , obtida pela Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (CBMM) (Brasil); SiO_2 , da marca Sibelco; Al_2O_3 APC 11 SG, da fabricante Alcoa (Brasil). Além disso, o aditivo orgânico utilizado para conceder consistência ao produto foi Polietilenoglicol (PEG 300), da empresa Isofar (Brasil).

Na Tabela 1, estão as densidades dos elementos utilizados para a confecção das cerâmicas:

Tabela 1 - Densidade dos elementos constituintes das cerâmicas produzidas.

| Material | Densidade (g/cm ³) |
|-----------|--------------------------------|
| Nb_2O_5 | 4,60 |
| SiO_2 | 2,65 |
| Al_2O_3 | 3,96 |
| PEG | 1,13 |

A densidade das misturas de pós foi calculada considerando a regra das misturas dada pela equação 1, em que foram consideradas as densidades de cada material e suas frações mássicas.

$$\rho = \rho_{Al_2O_3} \cdot m_{Al_2O_3} + \rho_{SiO_2} \cdot m_{SiO_2} + \rho_{Nb_2O_5} \cdot m_{Nb_2O_5} + \rho_{PEG} \cdot m_{PEG} \quad (1)$$

Neste experimento, foram produzidos três tipos de misturas de pó, variando o percentual de massa de sílica, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Composição em massa das amostras.

| | Al_2O_3 | SiO_2 | Nb_2O_5 | PEG |
|-----------|-----------|---------|-----------|-----|
| Mistura 1 | 91,6% | 0% | 3,82% | 5% |
| Mistura 2 | 90,69% | 0,39% | 3,8% | 5% |
| Mistura 3 | 90,84% | 0,77% | 3,82% | 5% |

Após isso, foram calculadas as densidades de cada mistura dos pós, utilizando a equação 1, e o resultado está disposto na Tabela 3.

Tabela 3 - Densidade teórica dos pós obtidas por meio da regra das misturas.

| Material | Densidade (g/cm ³) |
|-----------|--------------------------------|
| Mistura 1 | 3,538 |
| Mistura 2 | 3,529 |
| Mistura 3 | 3,526 |

2.2. Processamento das amostras

Com o objetivo de homogeneizar cada uma das misturas dos pós, os materiais foram adicionados em um jarro revestido de alumina. Com esse material, foram inseridos água deionizada na proporção mássica de 1:1 e bolas de alumina.

Esse sistema foi levado para um moinho de bolas por um período de 8 horas, seguido de secagem em estufa em uma temperatura de 80° C, por um tempo de 48 horas.

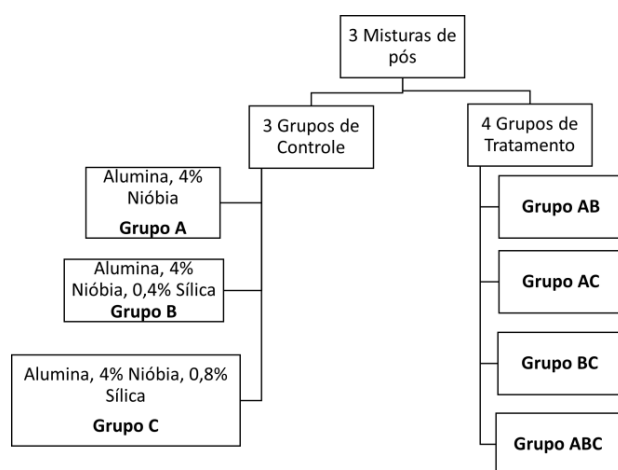
Depois da secagem, essas misturas foram desaglomeradas utilizando um pistilo e gral de porcelana. Em seguida, utilizou-se um agitador de peneiras para obter as dimensões desejadas dos grãos. O agitador de peneiras foi acionado por períodos de 3 minutos usando a peneira com abertura de 0,355 mm (42 mesh).

Após a preparação das três misturas de pós, o trabalho foi organizado de forma que essas combinações, quando prensadas, gerassem sete grupos de amostras, cada um com três amostras. Três desses grupos foram compostos por materiais homogêneos, um de cada mistura dos pós, chamados de “grupos de controle”. Os outros quatro grupos, chamados de “grupos de tratamento”, foram compostos de materiais com gradiente funcional, três com duas camadas (os grupos AB, AC e BC) e um com três camadas (grupo ABC), conforme a Figura 1.

Os corpos cerâmicos foram obtidos a partir de uma prensagem uniaxial a frio em uma prensa Skay com capacidade de 30 toneladas. Os discos cerâmicos foram preparados com matrizes de 47 mm de diâmetro

utilizando uma carga de 50 MPa. Após a prensagem, foram aferidas a massa e a espessura de cada amostra.

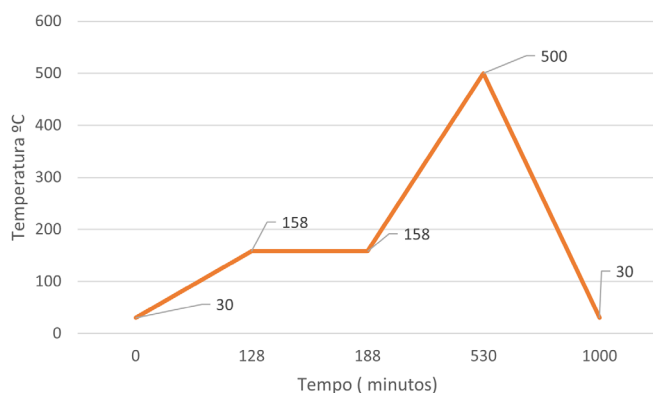
Figura 1 - Distribuição das amostras nos grupos de trabalho



A prensagem das amostras dos grupos homogêneos foi feita em duas etapas: primeiro foi feita uma pré-carga para assentar o material, e depois foi empregada uma carga principal de cerca de 50 MPa para obter o formato de pastilha à mistura. Já nos grupos cujas amostras são de materiais com gradiente funcional, uma pré-carga foi realizada para cada camada do material, e, após isso, foi feita uma carga principal no valor de 50 MPa.

A sinterização foi realizada em duas etapas. Na primeira, realizou-se a evaporação de ligantes, seguindo a rota da Figura 2.

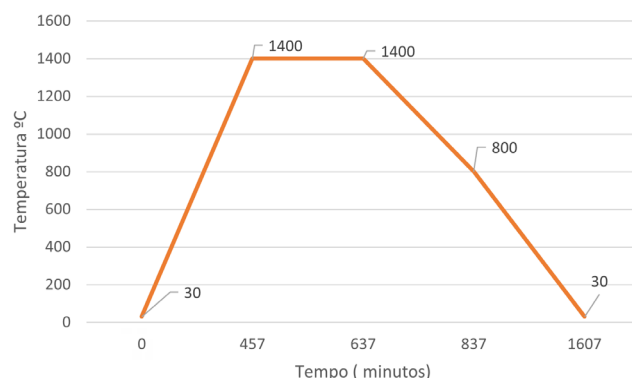
Figura 2 - Rota de evaporação de ligante



Após isso, os materiais foram colocados no forno INTI, da fornecedora Flyever, com controlador

FE50RPN, para a sinterização das amostras, de acordo com a rota da Figura 3.

Figura 3 - Rota de sinterização



A seguir, obtidos os corpos cerâmicos sinterizados, passou-se às etapas de caracterização.

2.3. Caracterização

2.3.1. Densidade à verde

A partir das densidades teóricas calculadas na Tabela 3 e das massas e espessuras aferidas após a prensagem, foi possível calcular a densidade à verde e a densificação à verde por meio da Equação 2 e da Equação 3.

$$\rho_{verde} = \frac{m_{amostra}}{V_{amostra}} \quad (2)$$

$$Desinficação_{verde} = \frac{\rho_{verde}}{\rho_{teorico}} \cdot 100\% \quad (3)$$

2.3.2. Densificação das Amostras Sinterizadas

O cálculo de densidade aparente e relativa, pelo método de Arquimedes, foi realizado de acordo com a norma NBR 16667:2017 [18], utilizando as medidas de massa imersa (m_i), massa úmida (m_u) e massa seca (m_s), em que m_l representa a massa específica da água destilada, neste caso igual a 1 g/cm³. Com esses parâmetros, foi possível, por meio da Equação 4 e da Equação 5 e da densidade teórica do corpo obtido

pela Tabela 3, calcular a densidade aparente e a densidade relativa.

$$d_a (g / cm^3) = \frac{m_s}{m_u - m_i} \cdot m_l \quad (4)$$

$$\rho_{relativa} = \frac{d_a}{d_{teorico}} \quad (5)$$

2.3.3. Difractometria de Raios X (DRX)

A análise por Difração de Raios X foi realizada no IME empregando um difratômetro Panalytical Xpert MRD, com radiação Co-K α com potência de 40 KVe.

A observação foi feita nos pós de partida e nas amostras já sinterizadas. Nas amostras dos grupos 1, 2 e 3, essa observação foi realizada em apenas uma das faces da amostra. Nas amostras dos grupos 4, 5, 6 e 7, nos grupos que apresentam gradiente funcional, a observação foi feita nas duas faces. Os parâmetros do teste foram uma corrente de 30 mA e uma varredura de 5 a 80°.

2.3.3. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Após as amostras serem fraturadas, a superfície de fratura foi observada no MEV para obter mais informações sobre a microestrutura do material, bem como a interface das camadas dos grupos com gradiente funcional.

Essa análise foi feita em um microscópio eletrônico de varredura QUANTA FEG 250, em que foi empregado um feixe de 20 kVe e 5 μ m de diâmetro. Os aumentos foram padronizados em 1000 X, 5000 X e 10.000 X, salvo para os casos em que se tentou observar a superfície fraturada como um todo, caso no qual se utilizou 35 e 75 X.

3. Resultados e discussão

3.1 Densificação à verde das Amostras

Na Tabela 3, estão descritos os resultados de densificação à verde dos conjuntos de amostras analisados.

Tabela 4 - Medidas de densidade relativa à verde das amostras.

| Grupos | Densidade (g/cm ³) | Densificação à verde (%) |
|-----------|--------------------------------|--------------------------|
| Grupo A | 2,449 \pm 0,043 | 68,57 \pm 1,26 |
| Grupo B | 2,385 \pm 0,018 | 67,32 \pm 0,54 |
| Grupo C | 2,328 \pm 0,055 | 65,73 \pm 1,34 |
| Grupo AB | 2,384 \pm 0,029 | 67,05 \pm 0,81 |
| Grupo AC | 2,382 \pm 0,033 | 66,85 \pm 0,93 |
| Grupo BC | 2,374 \pm 0,017 | 66,87 \pm 0,40 |
| Grupo ABC | 2,374 \pm 0,032 | 69,10 \pm 0,90 |

Os resultados apresentados mostram que a adição de sílica diminuiu a densificação da cerâmica em até 2,84%, compatível com a literatura [10]. A densificação dos grupos com gradiente funcional não apresentou comportamento igual em todos os casos. Destaca-se o resultado do último grupo ABC, que teve a maior densificação de todas, o que não era o esperado, dado que cada camada é mais difícil de ser empacotada e arranjada. Outro ponto importante é que todas as densificações à verde, em média, foram superiores a 55%, patamar mínimo necessário para se obter uma boa sinterização.

3.2 Densificação das amostras sinterizadas

Na Tabela 5, estão descritos os resultados de densidade relativa das amostras após a sinterização.

Tabela 5 - Medidas de densificação relativa das amostras sinterizadas.

| Grupos | Densidade relativa (%) |
|-----------|------------------------|
| Grupo A | 90,28 \pm 0,75 |
| Grupo B | 88,26 \pm 3,77 |
| Grupo C | 87,85 \pm 5,42 |
| Grupo AB | 92,25 \pm 3,75 |
| Grupo AC | 91,17 \pm 3,30 |
| Grupo BC | 90,98 \pm 1,55 |
| Grupo ABC | 93,23 \pm 0,45 |

A partir dos resultados da Tabela 5, pode-se observar que houve uma diminuição da densificação do

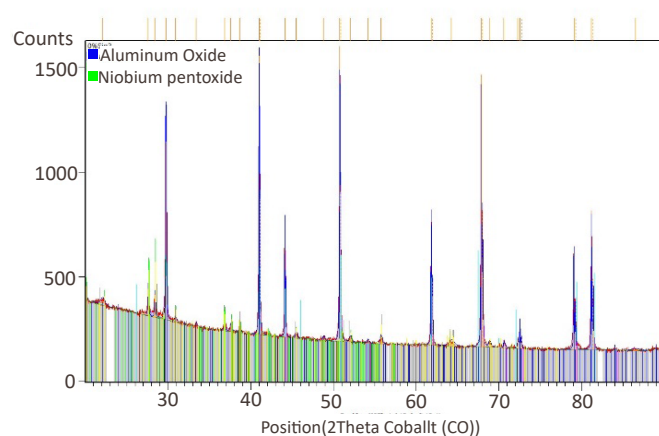
material à medida que se foi adicionando sílica, consistente com os resultados da referência [10,11].

Outro ponto observado é que as amostras com gradiente funcional tiveram, em média, densificações melhores do que os grupos com material homogêneo. O destaque mais uma vez está na densificação das amostras do grupo ABC com três camadas diferentes de material. Nesse caso, foi observado que o aumento do número de camadas aumentou a densificação das amostras, contrário ao que foi encontrado na referência [16].

3.3 Difractometria de Raios X (DRX)

Nas Figuras 4, 5 e 6, estão os difratogramas dos pós antes de serem prensados e sinterizados. Podemos observar que as misturas de pós realmente demonstraram picos correspondentes à alumina, nióbia e sílica. Isso sugere não haver impurezas nos materiais de partida, o que poderia prejudicar a densificação do material ou apresentar reações que mudariam a microestrutura do material sinterizado e, consequentemente, seu comportamento mecânico do corpo cerâmico final.

Figura 4 - DRX da mistura de pó A



O difratograma das amostras já sinterizadas apontou a presença de algumas fases além das fases presentes no DRX dos pós.

Uma fase que cumpre papel fundamental na maior densificação da alumina quando se adiciona nióbia é o niobato de alumínio. Essa fase foi encontrada em

basicamente todos os grupos de amostras sinterizadas, conforme Figura 7.

Figura 5 - DRX da mistura de pó B

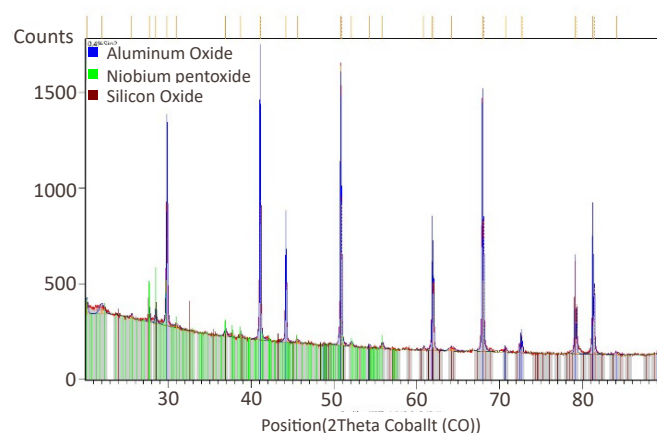


Figura 6 - DRX da mistura de pó C

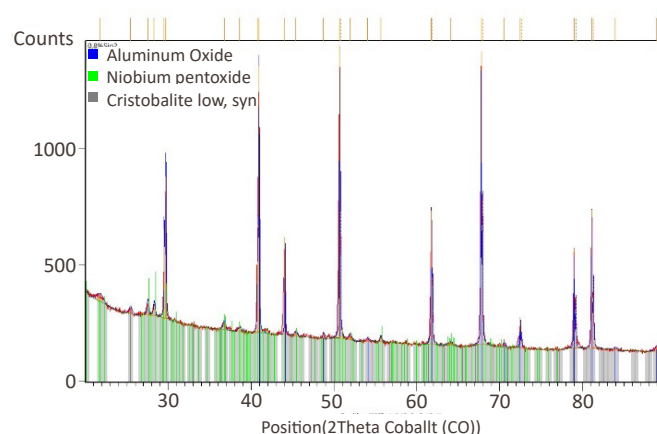
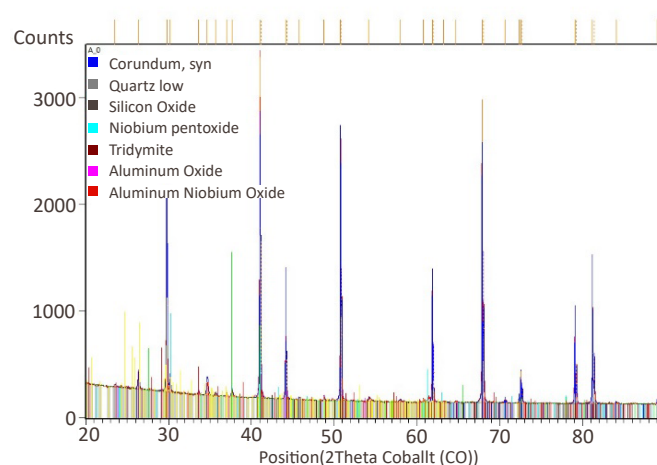


Figura 7 - DRX amostra sintetizada do grupo A



3.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As micrografias das fraturas foram observadas no MEV com ampliações de 1000 X, 5000 X e 10000 X.

Nos casos das amostras dos grupos com gradiente funcional também foi realizada a observação, com aumento de 35 X.

Figura 8 - Imagem da fratura do material do grupo ABC no lado A do material

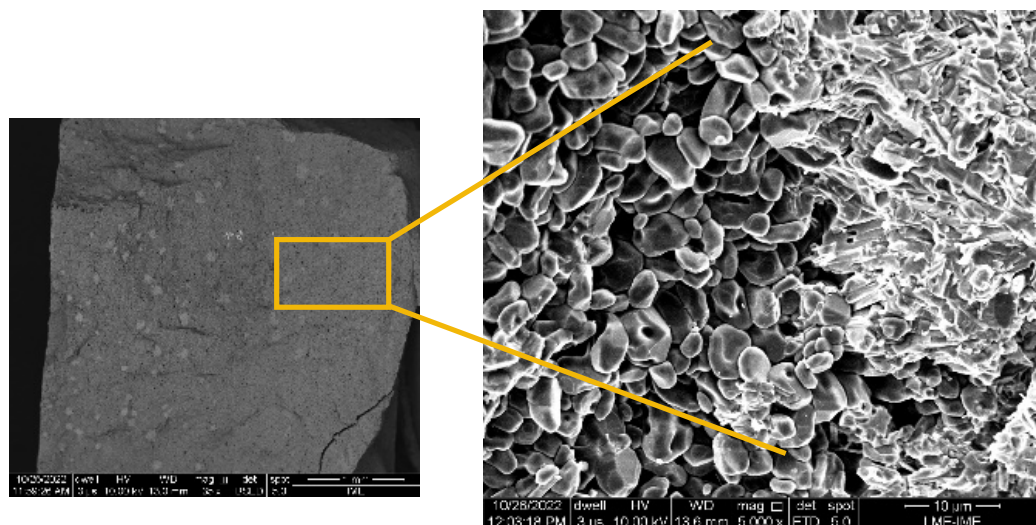
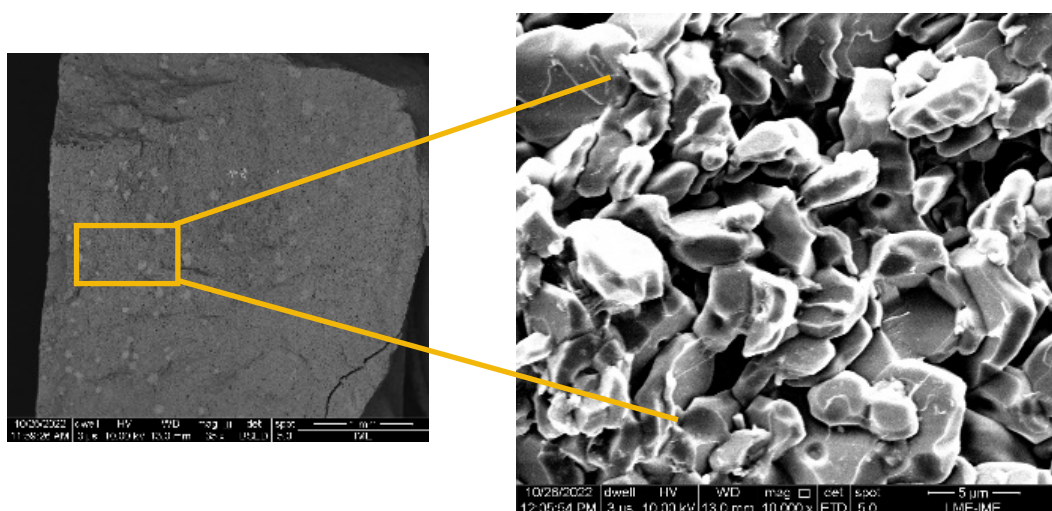


Figura 9 - Imagem da fratura do material do grupo ABC no lado C do material



Na imagem com aumento de 35 X, pode-se perceber que a compactação e a sinterização do material foram bem realizadas, pois não se observa nenhuma descon-tinuidade na transição entre as camadas do material.

Também foi possível perceber que a fratura ocor-reu predominantemente com característica intergra-nular, que, em geral, é inerente a materiais com me-lhor absorção de energia no impacto [10].

Além disso, foi possível constatar uma porosidade maior no lado do material C, que apresenta 0,8% de sílica. O que está de acordo com o resultado da densi-ficação do material mostrado neste trabalho.

Por fim, percebeu-se um tamanho médio de grão presente no lado do material A, o que mostra que a presença de sílica influenciou no crescimento de grão por meio da mulita. [10]

4. Conclusões

Neste trabalho, foram produzidas cerâmicas avançadas a partir de três misturas de pós de alumina (Al_2O_3), todas com presença de 4% em massa de nióbia (Nb_2O_5) e uma composição variável de sílica (SiO_2) em 0, 0,4 e 0,8%. Essas misturas de pós resultaram em sete grupos de corpos cerâmicos, cada um com três amostras. Por meio da comparação das densificações, pôde-se observar que o aumento de camadas pode ter

influenciado no aumento de densificação do material. Também foi constatado que os materiais com maior presença de sílica tiveram uma menor densificação. Por fim, foi observado que houve êxito na prensagem uniaxial a frio com sinterização em forno convencional, já que as amostras sinterizadas não apresentaram delaminações, e, da mesma forma, não foi possível observar descontinuidade na transição das camadas do material quando observado no MEV.

Referências

- [1] APPLEBY-THOMAS, G. J. *et al.* Fitzmaurice, On the effects of powder morphology on the post-comminution ballistic strength of ceramics. *International Journal of Impact Engineering*, Amsterdam, v.100, p. 46-55, 2017.
- [2] KOBAYASHI, A. Characteristics of high hardness alumina coatings formed by gas tunnel plasma spraying. *Journal of Thermal Spray Technology*, Berlin, v. 5, n. 3, p. 298-302, 1996.
- [3] BAUDÍN, C.; TRICOTEAUX, A.; JOIRE, A. Improved resistance of alumina to mild wear by aluminium titanate additions. *Journal of the European Ceramic Society*, Amsterdam, v. 34, p. 69-80, 2014.
- [4] YADAV, R. *et al.* Body armour materials: from steel to contemporary biomimetic systems. *RSC Advances*, London, n. 116, p. 115145-115174, 2016.
- [5] MEDVEDOVSKI, E. Ballistic performance of armour ceramics: influence of design and structure. Part 1. *Ceramics International*, v. 36, n. 7, p. 2103-2115, 2010.
- [6] CARTON, E. *et al.* Inertia as Main Working Mechanism for Ceramic Based Armour. *Journal Contribution*, [s. l.], 2019.
- [7] SILVA, M. V. *et al.* Blindagens Cerâmicas para Aplicações Balísticas: uma revisão. *Cerâmica*, São Paulo, v. 60, n. 355, p. 323-331, 2014.
- [8] MILAK, P. *et al.* The influence of dopants in the grain size of alumina – A review. *Materials Science Forum*, Bâch, v. 820, p. 280-284, 2015.
- [9] GOMES, A. V. *Comportamento balístico da alumina com adição de nióbia e variação da geometria do alvo*. Tese (Doutorado em Ciências dos Materiais) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2004.
- [10] GOMES, A. V. *Comportamento Balístico de alumina com adições de nióbia, sílica e magnésia*. Dissertação (Mestrado em Ciências dos Materiais) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 1999.
- [11] BÜRGER, D. *et al.* Ballistic impact simulation of an armour-piercing projectile on hybrid ceramic/fiber reinforced composite armours. *International Journal of Impact Engineering*, Amsterdam, v. 43, p. 63-77, 2012.
- [12] NASCIMENTO, L. F. C. *Caracterização do compósito de epóxi/fibra de malva para emprego em blindagem balística multicamada*. Tese (Tese de Doutorado) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2017.
- [13] MAHAMOOD, R. M. *et al.* Functionally graded material: an overview. *International Association of Engineers (IAENG)*, 2012.
- [14] Shanmugavel, P. *et al.* An overview of fracture analysis in functionally graded materials. *European Journal of Scientific Research*, [s. l.], v. 68, n. 3, p. 412-439, 2012.
- [15] WANG, S. S. Fracture mechanics for delamination problems in composite materials. *Journal of Composite Materials*, Thousand Oaks, v. 17, n. 3, p. 210-223, 1983.
- [16] JESUS, P. R. R. *Processamento e caracterização de um material cerâmico à base de alumina com gradiente funcional para aplicações balísticas*. Tese (Doutorado em Ciências dos Materiais) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2021.
- [17] LEUSHAKE, U. *et al.* General aspects of fgm fabrication by powder stacking. In: TRANS TECH PUBL. Materials science forum. [S.l.], 1999. v. 308.
- [18] ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. *ABNT NBR 16661:2017: Material refratário denso conformado – determinação de volume aparente, volume aparente da parte sólida, densidade da massa aparente, densidade aparente da parte sólida, porosidade aparente e absorção*. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

Estimação de azimute a partir de múltiplas conformações de feixe fixas em sistema radar com arranjo de antenas

Vitor Augusto Ferreira Santa Rita¹, Alberto Gaspar Guimarães², Ernesto Leite Pinto³

¹Instituto Militar de Engenharia (IME), Rio de Janeiro (RJ), Brasil, vitoraugusto.rita@ime.cb.br

²Universidade Federal Fluminense (UFF), Niterói (RJ), Brasil, agaspar@id.uff.br

³Instituto Militar de Engenharia (IME), Rio de Janeiro (RJ), Brasil, ernesto@ime.cb.br

Resumo: Investiga-se neste trabalho o emprego de uma abordagem de máxima verossimilhança (ML, de “maximum likelihood”) combinada com um número reduzido de conformações de feixe fixas para realizar a estimação do azimute de um alvo num sistema radar de vigilância munido de arranjo de sensores. São apresentados resultados de simulação para avaliação de desempenho do estimador com base em apenas duas conformações. É possível verificar que há grande vantagem do estimador ML em comparação com um estimador monopulso amplamente utilizado que se vale da mesma quantidade de conformações. Resultados adicionais mostram que ganhos maiores de desempenho podem ser obtidos com a abordagem ML aqui investigada utilizando apenas uma conformação de feixe a mais.

Palavras-chave: Radar. Estimação de Azimute. Arranjo de Antenas. Conformação de Feixe. Máxima Verossimilhança.

Abstract: This work investigates the combination of the Maximum Likelihood (ML) approach with a reduced number of fixed beam steerings in order to estimate target azimuth in a surveillance radar-based system equipped with sensor array. Simulation-based performance results of the estimator using only two fixed beams are presented. It is verified that there is a great advantage of the ML solution compared to an usual monopulse estimator, which employs the same number of beams. Additional results show that greater performance gains can be obtained with the investigated ML approach using only one additional beam.

Keywords: Radar. Azimuth Estimation. Antenna Array. Beamforming. Maximum Likelihood.

1. Introdução

O emprego de arranjo de antenas e processamento digital de sinais em sistemas radar é um importante recurso de uso corrente, permitindo, entre outras operações, a filtragem espacial de sinais [1-2]. Uma questão importante neste contexto é a estimação de azimute do alvo em relação ao referencial radar, havendo várias propostas na literatura com este objetivo [3-4].

O presente artigo tem como foco a estimação de azimute em radares de busca e vigilância [5] que utilizam um arranjo linear de antenas.

Os radares de busca e vigilância de maneira geral se caracterizam por seguir uma rotina de processamento num amplo volume do espaço em que:

- a cada intervalo de tempo a direção de referência de apontamento da antena é deslocada para o

centro de um setor, visando detectar a presença de um alvo e, em caso de detecção, estimar a sua posição;

- em seguida, a direção de referência de apontamento da antena é deslocada para o centro de um setor vizinho, buscando cobrir progressivamente toda a região de interesse.

Esta rotina básica é seguida tanto por radares primários quanto secundários. A diferença, para o problema aqui tratado, é a origem do sinal recebido [5]. No primeiro caso, o sinal resulta de um eco produzido pela presença de um alvo na direção de referência de apontamento, em resposta a uma transmissão prévia feita pelo radar primário. Já no segundo caso, o sinal é recebido de uma transmissão feita por um transmissor cooperativo (*transponder*).

Em ambas as aplicações, é de grande interesse que o estimador de azimute tenha precisão elevada

num intervalo angular o mais largo possível em torno da direção de referência de apontamento do radar [6-7]. Isto possibilita a redução do tempo total de cobertura da região de interesse, aumentando assim a taxa de atualização de informação de posição do alvo [8]. A habilidade de estimar satisfatoriamente azimutes em torno da direção de referência de apontamento será aqui denominada *abrangência* do estimador de azimute.

Outro requisito desejável para um estimador de azimute em radares de busca e vigilância é a reduzida complexidade computacional, devido à necessidade de repetição de sua operação a intervalos curtos de tempo.

Um exemplo bem conhecido de um estimador de azimute de baixa complexidade computacional é o das técnicas monopulso [5], originalmente implementadas usando duas antenas de recepção com respostas angulares distintas. Nessas técnicas, a estimativa de azimute é obtida com base numa aproximação linear da razão entre a diferença e a soma dos sinais provenientes das antenas acima mencionadas, denominada *razão monopulso*.

Em se tratando de um estimador de azimute baseado em arranjo linear de antenas, uma alternativa para reduzir sua complexidade é utilizar um número limitado de conformações de feixe fixas, obtidas por combinações lineares adequadas dos sinais recebidos no arranjo. Na literatura de processamento de sinais em radar podem ser encontrados outros usos de conformações de feixe fixas, tais como em [9-12].

Duas conformações de feixe fixas são suficientes para a implementação de um estimador do tipo monopulso com arranjo linear de antenas, produzindo soluções de complexidade muito baixa. As técnicas monopulso, contudo, se caracterizam por produzir estimação satisfatória apenas se o alvo estiver numa região pequena, próximo à direção de referência de apontamento da antena [5,7,13]. Ou seja, são técnicas de pequena abrangência.

Cabe notar que a possibilidade de detecção de um alvo localizado fora dessa região é baixa, mas não pode ser desconsiderada. Em casos assim, a aplica-

ção de uma técnica monopulso gera erros elevados de estimação [14]. Esses erros podem ser corrigidos em outras etapas de processamento de um receptor radar, mas a busca de alternativas para evitá-los ou reduzi-los ainda é de interesse [13].

Este artigo se propõe a desenvolver e avaliar um estimador de maior abrangência através da técnica de máxima verossimilhança (ML, de *maximum likelihood* [15]) utilizando um número reduzido de conformações de feixe fixas.

Apresenta-se inicialmente a dedução de um estimador ML baseado em múltiplas conformações de feixe que lida com dois outros parâmetros desconhecidos, além do azimute. Em seguida, o trabalho se concentra na estimação de azimute, em condições iguais ou próximas das usualmente admitidas para emprego de técnicas monopulso.

A implementação dos estimadores ML considerados neste trabalho requer uma técnica de otimização numérica para encontrar o valor do argumento que maximiza a função objetivo. Optou-se pelo uso de um algoritmo PSO (*particle swarm optimization*) [16-18] para este fim.

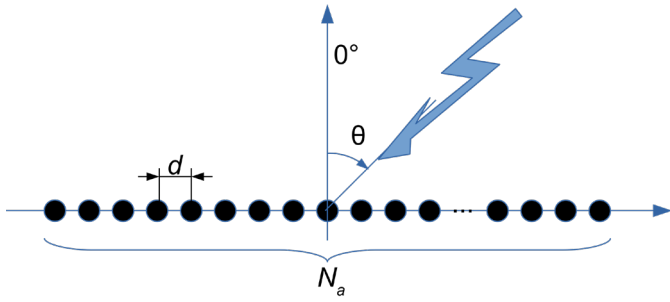
Mostra-se, através de resultados de simulação, que a abordagem ML em um conjunto pequeno de conformações de feixe fixas permite a obtenção de aumentos significativos na abrangência de estimação em relação a uma técnica monopulso típica.

O artigo está organizado em seis seções. Na seção II é apresentado o modelo do sistema adotado. Na seção III é apresentada a estratégia de estimação investigada, na seção IV se apresenta o equacionamento da técnica monopulso usada como referência, e na seção V são apresentados os resultados de avaliação de desempenho. Por fim, a seção VI contém as principais conclusões do trabalho.

2. Modelo de sistema

Considera-se neste trabalho o emprego de um arranjo composto de N_a elementos de antena, omnidirecionais, espaçados entre si de uma distância fixa d ao longo de uma estrutura linear. Uma ilustração deste tipo de arranjo é mostrada na Figura 1.

Fig. 1 - Modelo do arranjo de antena.



Admite-se a reflexão passiva pelo alvo do sinal enviado por um radar primário ou a transmissão por um transmissor cooperativo com recepção do sinal por um radar secundário. Para ambas as situações, considera-se que a frente de onda proveniente do alvo incide sobre o radar fazendo um ângulo θ com a direção normal ao arranjo linear, conforme mostra a Fig. 1.

Considerando um cenário com radar primário, a envoltória complexa do sinal transmitido é dada por

$$\tilde{s}_t(t) = \alpha_t(\theta) \rho(t), \quad t \in [0, N_p T], \quad (1)$$

em que

$$\rho(t) = \sum_{m=0}^{N_p-1} p(t - mT), \quad (2)$$

sendo N_p o número de pulsos em sequência, T o intervalo de tempo entre pulsos, $p(t)$ o formato de pulso básico transmitido e $\alpha_t(\theta)$ uma amplitude complexa cujo módulo é relacionado à potência de transmissão na direção θ .

O equivalente em banda básica do sinal recebido pelo k -ésimo sensor do arranjo pode ser expresso como [11]

$$x_k(t) = \alpha_r(\theta) \rho\left(t - \tau - \frac{kd}{c} \sin\theta\right) e^{-j2\pi\left(f_c \tau + k \frac{d}{\lambda} \sin\theta\right)} + z_k(t), \quad (3)$$

com $k \in \{0, \dots, N_a - 1\}$. Os termos f_c e λ denotam, respectivamente, a frequência e o comprimento de onda da portadora, c é a velocidade da luz e τ é o atraso em relação ao instante de transmissão.

A amplitude de $\alpha_t(\theta)$ depende da potência vinda do alvo (por transmissão própria ou reflexão, em

função do tipo de radar) e do ganho do diagrama de recepção em θ . É admitido que $\alpha_t(\theta)$ é desconhecido, porém de natureza não aleatória.

Por sua vez, o termo $z_k(t)$ representa o ruído térmico gerado pelo k -ésimo sensor, sendo modelado como um processo complexo gaussiano, de média nula e densidade espectral de potência constante numa faixa de frequências muito maior do que a ocupada pelo sinal de interesse. A Equação (3) ignora um eventual deslocamento Doppler da frequência do sinal, porém essa suposição é razoável para muitas aplicações [19].

Supõe-se¹ que $N_a d / c \ll \tau$, e redefine-se a amplitude complexa com incorporação de fatores de defasagem que independem da posição do sensor. Assim, a expressão (3) é reescrita como

$$x_k(t) \approx \alpha \rho(t - \tau) e^{-j2\pi\left(k - \frac{N_a - 1}{2}\right) \frac{d}{\lambda} \sin\theta} + z_k(t), \quad (4)$$

sendo $\alpha = \alpha_r(\theta) e^{-j\pi\left(2f_c \tau + (N_a - 1) \frac{d}{\lambda} \sin\theta\right)}$.

É importante observar que o fator α depende de θ e τ . Entretanto, no problema aqui definido, esta dependência será desconsiderada, tal como em [19,20].

Reescrevendo (4) em notação vetorial, tem-se

$$\mathbf{x}(t) = \alpha \rho(t - \tau) \mathbf{a}(\psi) + \mathbf{z}(t), \quad (5)$$

em que $\mathbf{x}(t) = [x_k(t)]_{k=0}^{N_a-1}$ e $\mathbf{z}(t) = [z_k(t)]_{k=0}^{N_a-1}$ são vetores-coluna de dimensão $N_a \times 1$ e $\mathbf{a}(\psi)$ é o *vetor-diretor* dado por

$$\mathbf{a}(\psi) = \begin{bmatrix} e^{j\left(\frac{N_a-1}{2}\right)\psi} & \dots & e^{-j\left(\frac{N_a-1}{2}\right)\psi} \end{bmatrix}^T, \quad (6)$$

sendo

$$\psi = 2\pi \frac{d}{\lambda} \sin\theta \quad (7)$$

¹ Suposição válida porque a distância do radar ao alvo é usualmente muito maior que $N_a d$.

com $\theta \in [-\pi/2, \pi/2]$.

Aos sinais gerados na saída dos sensores é aplicado um conjunto de N_c conformações fixas de feixes, conforme mostra a Figura 2, que ilustra a sequência das principais operações realizadas no receptor.

Os sinais gerados pelas conformações são dados por

$$y(t) = W^H x(t) \quad y(t) = W^H x(t) \quad (8)$$

$$= \alpha \rho(t - \tau) g(\psi) + v(t), \quad (9)$$

em que

$$g(\psi) = W^H a(\psi), \quad (10)$$

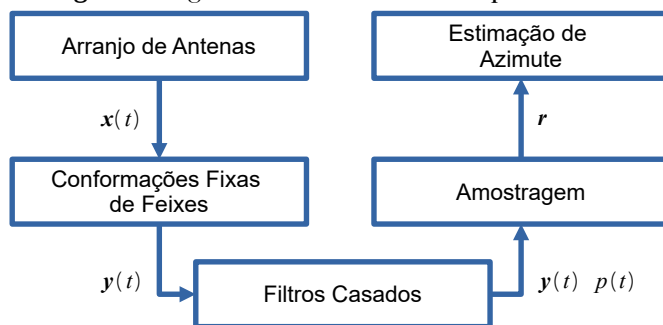
$$v(t) = W^H z(t) \quad (11)$$

e W é a matriz de conformação fixa com dimensão $N_a \times N_c$. Cada coluna dessa matriz corresponde ao vetor normalizado de conformação de feixe em uma dada direção $\theta_c \in [-\pi/2, \pi/2]$, definido como

$$w_{\psi_c} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{1}{\sqrt{N_a}} a(\psi_c), \quad (12)$$

com $c \in \{1, \dots, N_c\}$, $a(\cdot)$ definido na Equação (6) e $\psi_c = 2\pi \frac{d}{\lambda} \sin \theta_c$.

Fig. 2 - Diagrama de blocos do receptor.



Convém observar que se W for unitária, i.e., $WW^H = I$, o vetor de ruído $v(t)$ tem matriz covariância $E[v(t)v^H(t)] = \sigma^2 I$. Em [15], é demonstrado que essa condição é alcançada se $\theta_{c_i} - \theta_{c_j} = 2k\pi/N_a$, $\forall c_i, c_j \in \{0, \dots, N_c - 1\}$ e $k \in \mathbb{Z}$.

Conforme mostrado na Figura 2, os sinais resultantes das conformações de feixe passam por filtros casados e são amostrados, dando origem à entrada

do estimador de azimute. Considera-se os instantes de amostragem dados por

$$t_{l,m} = t_0 + (l-1)T_a + (m-1)T, \quad (13)$$

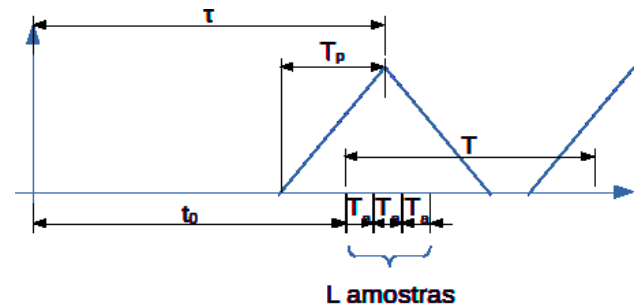
para $m \in \{1, \dots, N_p\}$ e $l \in \{1, \dots, L\}$, sendo L a quantidade de amostras sucessivas por pulso e T_a o intervalo de tempo entre amostras.

Admite-se que o pulso na saída do filtro casado tem energia significativa no intervalo de T_p segundos e que o instante inicial T_0 é tal que

$$t_0 \in [\tau - T_p/2; \tau + T_p/2]. \quad (14)$$

Um exemplo em que o pulso na saída do filtro casado tem formato triangular é mostrado na Figura 3.

Figura 3 - Exemplo de instantes de amostragem.



As $N_p L$ amostras obtidas para cada uma das conformações de feixe são reunidas no vetor r de dimensão $(N_c L N_p) \times 1$ dado por

$$r = \alpha n(\psi, \tau) +, \quad (15)$$

em que

$$\eta(\psi, \tau) = \begin{bmatrix} g_1(\psi) \chi_\tau \\ g_2(\psi) \chi_\tau \\ \vdots \\ g_{N_c}(\psi) \chi_\tau \end{bmatrix}, \quad (16)$$

sendo $g_c(\psi)$ o c -ésimo elemento do vetor $g(\psi)$ dado na Equação (10), e χ_τ um vetor de dimensão $(L N_p) \times 1$ com amostras do trem de pulsos resultante da filtragem de $\rho(t - \tau)$, obtidas nos instantes $t_{l,m}$.

Ainda na expressão (15), o vetor de ruído n é gaussiano, de média nula, e pode ser expresso da forma

$$n = \begin{bmatrix} n_1 & \cdots & n_{N_c} \end{bmatrix}^T, \quad (17)$$

sendo n_c o vetor coluna que reúne as amostras do ruído filtrado associado à c -ésima conformação.

Portanto, de (15), o vetor de observações r é gaussiano com vetor média

$$\mu = E[r] = \alpha \eta(\psi, \tau) \quad (18)$$

e matriz covariância

$$\Sigma = E[(r - \mu)(r - \mu)^H] = E[nn^H], \quad (19)$$

a qual pode ser expressa em blocos como

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \Sigma_{c_1 c_1} & \cdots & \Sigma_{c_1 c_{N_c}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \Sigma_{c_{N_c} c_1} & \cdots & \Sigma_{c_{N_c} c_{N_c}} \end{bmatrix}, \quad (20)$$

em que $\Sigma_{c_i c_j} = E[n_{c_i} n_{c_j}^H]$, com $c_i, c_j \in \{1, \dots, N_c\}$.

3. Estimação ML

O vetor de observações r dado na Equação (15) é gaussiano, com apenas o vetor média dependente dos parâmetros (α, τ, ψ) . Portanto, a função logarítmica de verossimilhança [15] pode ser expressa como

$$l((\alpha, \tau, \psi); r) = \frac{-1}{2} (r - \alpha \eta(\psi, \tau))^H \Sigma^{-1} (r - \alpha \eta(\psi, \tau)) + \xi, \quad (21)$$

sendo ξ uma constante escalar que não depende dos parâmetros α, τ, ψ . A estimativa de máxima verossimilhança [15] destes parâmetros é o argumento que maximiza $l(\cdot)$, ou, equivalentemente,

$$(\hat{\alpha}_{ML}(r), \hat{\tau}_{ML}(r), \hat{\psi}_{ML}(r)) = \underset{(\alpha, \tau, \psi)}{\operatorname{argmin}} v(\alpha, \tau, \psi; r), \quad (22)$$

em que

$$v(\alpha, \tau, \psi; r) = (r - \alpha \eta(\psi, \tau))^H \Sigma^{-1} (r - \alpha \eta(\psi, \tau)). \quad (23)$$

A estimativa $\hat{\alpha}_{ML}(r)$ pode ser obtida partindo-se da equação abaixo, que estabelece uma condição ne-

cessária para a minimização de $v(\cdot)$ em função do parâmetro α :

$$\left. \frac{\partial v}{\partial \alpha} \right|_{\alpha=\alpha_{ML}} = 0. \quad (24)$$

Após algumas manipulações algébricas, considerando que Σ não depende de α , chega-se a

$$\hat{\alpha}_{ML}(r) = \frac{\eta^H(\psi, \tau) \Sigma^{-1} r}{\eta^H(\psi, \tau) \Sigma^{-1} \eta(\psi, \tau)}. \quad (25)$$

Com o resultado acima, a estratégia adotada para a determinação da estimativa ML de (τ, ψ) é substituir a Equação (25) na Equação (23), obtendo-se, após alguns passos, a seguinte solução:

$$(\hat{\tau}_{ML}(r), \hat{\psi}_{ML}(r)) = \underset{(\tau, \psi)}{\operatorname{argmax}} \frac{|\eta^H(\psi, \tau) \Sigma^{-1} r|^2}{\eta^H(\psi, \tau) \Sigma^{-1} \eta(\psi, \tau)}, \quad (26)$$

a qual requer a implementação de um procedimento numérico de otimização.

Uma vez obtidas as estimativas de $(\hat{\tau}_{ML}(r), \hat{\psi}_{ML}(r))$, retorna-se à Equação (25) para a obtenção de $\hat{\alpha}_{ML}(r)$.

3.1 Matriz de conformação unitária

Se a matriz W de conformação for unitária, é fácil verificar que $\Sigma_{c_i c_j} = 0$ (matriz nula) para $i \neq j$ e com isto, da expressão mostrada na Equação (20), Σ é uma matriz bloco diagonal.

Neste caso, as estimativas ML dos parâmetros de interesse são dadas por

$$(\hat{\tau}_{ML}(r), \hat{\psi}_{ML}(r)) = \underset{(\tau, \psi)}{\operatorname{argmax}} \frac{\left| \sum_{c=1}^{N_c} g_c(\psi) \chi_{\tau}^H \Sigma_{cc}^{-1} r_c \right|^2}{\sum_{c=1}^{N_c} |g_c(\psi)|^2 \chi_{\tau}^H \Sigma_{cc}^{-1} \chi_{\tau}} \quad (27)$$

e

$$\hat{\alpha}_{ML}(r) = \frac{\sum_{c=1}^{N_c} g_c(\psi) \chi_{\tau}^H \Sigma_{cc}^{-1} r_c}{\sum_{c=1}^{N_c} |g_c(\psi)|^2 \chi_{\tau}^H \Sigma_{cc}^{-1} \chi_{\tau}} \quad \begin{matrix} \tau = \hat{\tau}_{ML}(r), \\ \psi = \hat{\psi}_{ML}(r) \end{matrix} \quad (28)$$

sendo r_c o vetor de observações obtido para a c -ésima conformação.

É importante observar que na Equação (27) os vetores e matrizes têm dimensões N_c vezes menores do que na Equação (26), tornando o procedimento de otimização computacionalmente bem mais simples.

3.2 Otimização numérica

Optou-se pelo uso da técnica PSO a fim de obter numericamente as estimativas de azimute e atraso das nas equações (26) e (27).

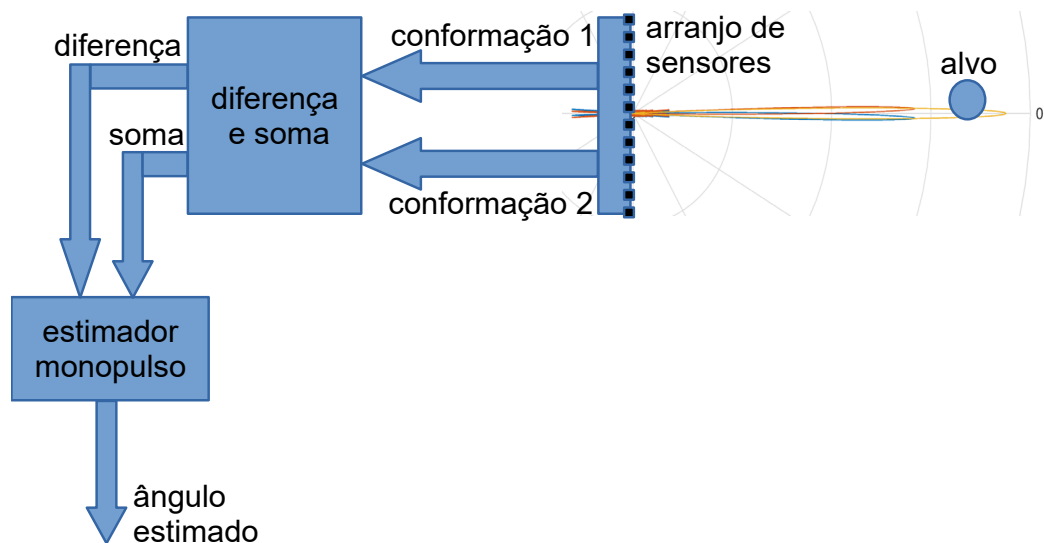
O algoritmo PSO original foi apresentado em [17] e utiliza um enxame, formado por um conjunto de partículas que evolui ao longo das iterações para realizar uma varredura bastante flexível do espaço de busca do valor ótimo da função objetivo. Casos de uso

do algoritmo PSO na estimação ML de parâmetros são encontrados, por exemplo, em [16,18,21]. Neste trabalho, optou-se pela versão desse algoritmo denominada de APSO (do inglês *Accelerated Particle Swarm Optimization*), que se caracteriza por apresentar convergência rápida [22].

4. Técnica monopulso

As técnicas do tipo monopulso [5] baseadas em arranjo linear de sensores geram simultaneamente dois valores resultantes de conformações de feixe, conforme ilustrado na Figura 4. Calculando-se a razão entre a diferença e a soma destes valores, obtém-se a razão monopulso, que é utilizada para alcançar a estimativa de azimute.

fig. 4 - Estimação de azimute por radar monopulso com arranjo de sensores.



4.1 Monopulso de amplitude

No caso específico da técnica monopulso de amplitude, as duas conformações de feixe são definidas com inclinações simétricas em relação à direção normal ao arranjo linear. Denota-se por $W_{\psi_{+\epsilon}}$ e $W_{\psi_{-\epsilon}}$ os vetores de conformações utilizados, correspondendo respectivamente às inclinações $\psi_{+\epsilon}$ e $\psi_{-\epsilon}$, que são expressos conforme a equação (12).

Além disso, considerando que depois de filtrados os sinais provenientes dessas conformações são amostrados no instante $t = t_0 = \tau$, obtém-se, com base nas equações (15) e (16), o vetor dado por

$$r = \begin{bmatrix} \alpha \chi_1^H W_{\psi_{+\epsilon}}^H a(\psi) + n_{\psi_{+\epsilon}} \\ \alpha \chi_1^H W_{\psi_{-\epsilon}}^H a(\psi) + n_{\psi_{-\epsilon}} \end{bmatrix}, \quad (29)$$

em que $n_{\psi+\epsilon}$ e $n_{\psi-\epsilon}$ são amostras de ruído associadas às respectivas conformações.

Define-se então a *razão monopulso* como

$$\beta \stackrel{\text{def}}{=} \frac{r_1 - r_2}{r_1 + r_2}, \quad (30)$$

em que r_1 e r_2 são, respectivamente, o primeiro e segundo elemento de r na Equação (29).

A *razão monopulso idealizada* é definida desprezando-se as parcelas de ruído na Equação (30), sendo dada por

$$\beta_{id}(\psi) \stackrel{\text{def}}{=} \frac{(w_{\psi+\epsilon}^H - w_{\psi-\epsilon}^H)a(\psi)}{(w_{\psi+\epsilon}^H + w_{\psi-\epsilon}^H)a(\psi)}. \quad (31)$$

Substituindo as equações (12) e (6) na equação anterior e supondo N_a ímpar², obtém-se, após algumas manipulações algébricas,

$$\beta_{id}(\psi) = \frac{\sum_{k=1}^{(N_a-1)(N_a-1)/2} \text{sen}(k\psi) \text{sen}(k\psi_\epsilon)}{1/2 + \sum_{k=1}^{(N_a-1)(N_a-1)/2} \cos(k\psi) \cos(k\psi_\epsilon)}. \quad (32)$$

A aproximação linear de $\beta_{id}(\psi)$ em torno de $\psi = 0$ é dada por

$$\beta_{id}(\psi) \approx \beta'_{id}(0)\psi, \quad (33)$$

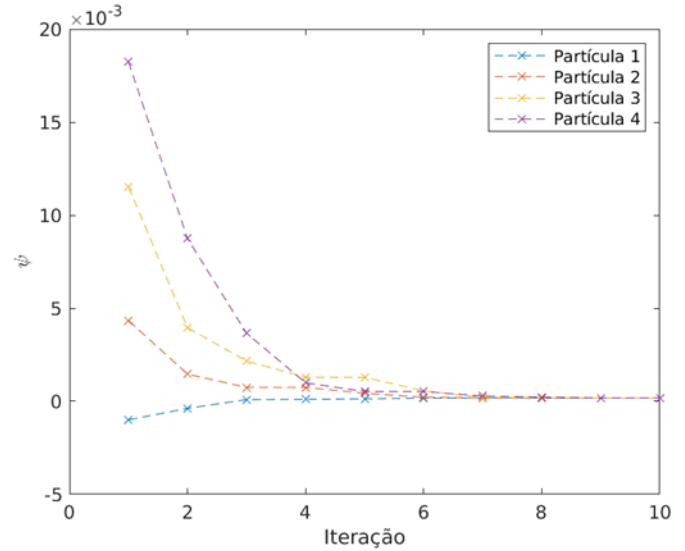
sendo $\beta'_{id}(0)$ a derivada de $\beta_{id}(\psi)$ em $\psi = 0$, a qual pode ser calculada pela expressão

$$\beta'_{id}(0) = \frac{\sum_{k=1}^{(N_a-1)(N_a-1)/2} k \text{sen}(k\psi_\epsilon)}{1/2 + \sum_{k=1}^{(N_a-1)(N_a-1)/2} \cos(k\psi_\epsilon)}. \quad (34)$$

Admitindo-se que a parte real da razão monopulso medida dada pela Equação (30) pode ser aproximada por $\beta_{id}(\psi)$, e que esta pode ser aproximada por (33), chega-se finalmente à seguinte expressão para a estimativa de ψ usando esta técnica monopulso de amplitude:

² O desenvolvimento considerando N_a par é bastante similar.

Fig. 5 - Ilustração da evolução de quatro partículas do enxame, na implementação do estimador ML(2) com RSR = 20 dB e azimuth do alvo em 0 rad.



$$\hat{\psi}_{mp} = \frac{\Re[\beta]}{\beta'_{id}(0)}, \quad (35)$$

em que a notação $\Re[\cdot]$ denota a parte real do argumento e $\beta'_{id}(0)$ é uma constante calculada com o uso da equação (34).

5. Avaliação de desempenho

Foram realizadas simulações de um receptor radar com arranjo de $N_a = 101$ elementos espaçados de uma distância $d = \lambda/2$ e sinal com pulso básico de formato retangular.

A razão sinal/ruído (RSR) considerada é dada pela divisão da potência média do sinal de interesse na entrada do arranjo pela potência média de ruído na faixa de frequências ocupada por este sinal. Para este fim, considerou-se como largura de faixa o inverso da duração do pulso básico.

Para comparação com a técnica monopulso de amplitude, são consideradas inicialmente apenas 2 conformações ($N_c = 2$) no emprego da técnica ML.

No texto a seguir, ML(N_c) denota a técnica de estimação ML com N_c conformações e MA, o estimador monopulso de amplitude acima apresentado.

Admite-se nesta comparação que o parâmetro de atraso (τ) é conhecido, o que é feito usualmente em trabalhos que lidam com técnicas monopulso [5,6,7,14].

Em termos mais específicos, as estimativas ML foram obtidas como solução do problema de otimização em ψ com função objetivo dada pela equação (26), admitindo o valor de τ conhecido. Cabe lembrar que o parâmetro ψ possui uma relação biunívoca com o ângulo físico de chegada do sinal na entrada do arranjo, dada na Equação (7).

Com relação ao algoritmo APSO, o número de partículas utilizado foi 30 e o número de iterações até a parada foi ajustado empiricamente em 15.

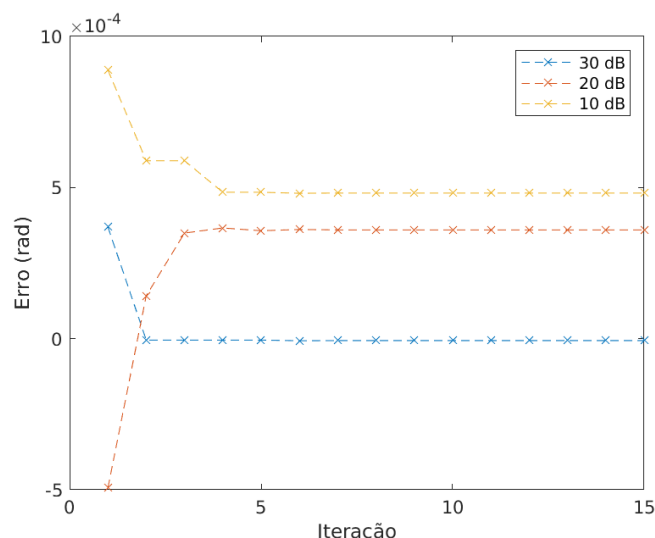
Uma ilustração da evolução, ao longo das iterações, da estimativa de azimuth de quatro partículas do enxame no algoritmo APSO é mostrada na Figura 5, a qual foi obtida com RSR = 20 dB e azimuth do alvo em 0 rad.

Nota-se na Figura 5 que, a partir da 8ª iteração, há uma concentração significativa das estimativas em torno do valor real do ângulo do alvo.

Já na Figura 6 são mostrados três exemplos da evolução do erro de estimação obtidas com enxame de 30 partículas e RSR de 30, 20 e 10 dB.

Percebe-se uma rápida estabilização do erro e coerência entre RSR e erro, no sentido de que o aumento da primeira está associado à redução do segundo. Comportamentos semelhantes foram observados em outros testes deste tipo.

Figura 6 - Erro de estimação com a técnica ML(2) e diferentes valores de RSR.



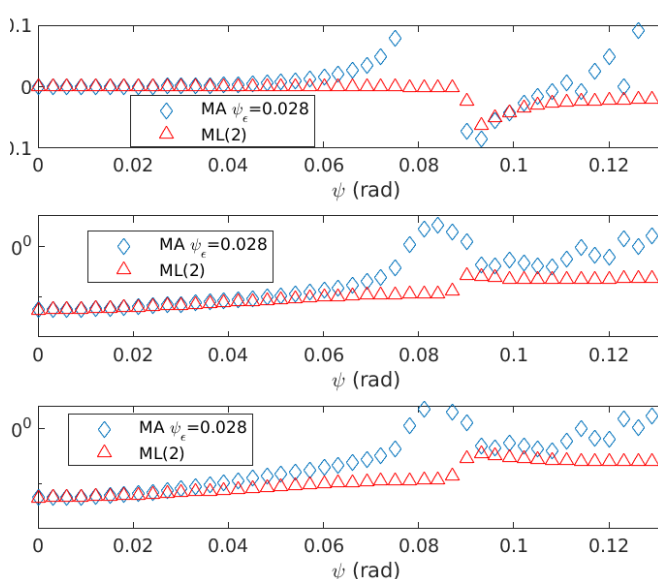
Em seguida, são apresentados resultados de avaliação empírica de polarização, variância e erro quadrático médio (EQM) de diferentes estimadores, obtidos com base em 2.000 realizações independentes.

Uma primeira comparação de desempenho entre as técnicas ML(2) e MA foi realizada com inclinações $\psi_{\pm\epsilon} = \pm 0,028$ rad. Os resultados obtidos com 10 dB de RSR estão mostrados na Figura 7.

Percebe-se nesta figura que o desempenho do estimador MA é praticamente idêntico ao do estimador ML(2) para valores baixos de azimuth do alvo, com diferenças muito significativas surgindo para valores maiores. Nota-se em particular o crescimento da polarização do estimador monopulso acima de 0,04 rad. Percebe-se também que a degradação de desempenho deste estimador se intensifica para maiores valores de azimuth, de modo que o EQM aumenta rapidamente.

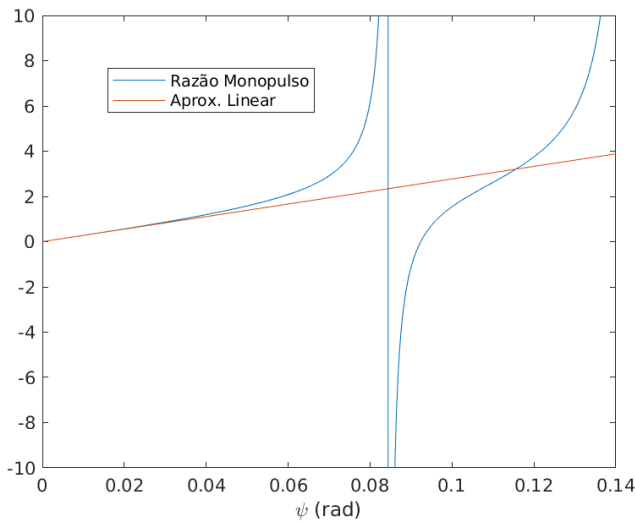
Essas características de desempenho do estimador MA podem, em grande medida, ser vistas como consequência direta da imprecisão na aproximação linear da razão monopulso, que se intensifica com o aumento do valor do azimuth. Uma ilustração deste efeito é dada na Figura 8 para o caso da razão monopulso idealizada correspondente às condições da Figura 7.

Figura 7 - Desempenho dos estimadores ML(2) e MA em função do azimuth do alvo com RSR de 10 dB.



Percebe-se na Figura 8 que, de fato, a aproximação linear se mostra satisfatória para valores de azimuth um pouco inferiores a 0,04 rad e se torna de maneira geral inadequada com azimuths acima deste valor.

Figura 8 - Razão MA idealizada e sua aproximação linear em função do azimuth do alvo.



No que diz respeito ao estimador ML(2), a Figura 7 mostra que ele tem polarização praticamente desprezível para valores de azimuth até aproximadamente 0,09 rad.

Os resultados desta figura mostram, em seu conjunto, que o estimador ML(2) tem desempenho global significativamente superior ao do estimador MA para valores de azimuth entre 0,04 e 0,09 rad, proporcionando um aumento significativo de *abrangência*.

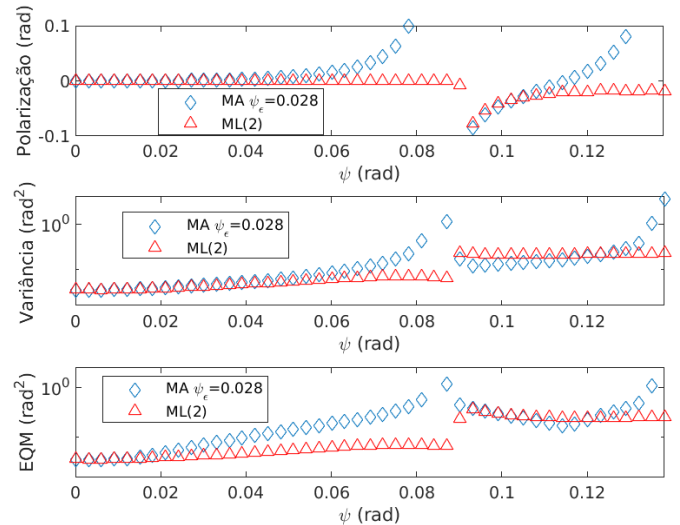
Os resultados da Figura 9 foram obtidos com RSR de 20 dB e as mesmas inclinações $\psi_{\pm\epsilon} = \pm 0,028$ rad. Esses resultados confirmam o aumento de *abrangência* proporcionado pelo estimador ML(2) em comparação com o MA. Nota-se, em particular, resultados praticamente idênticos aos da Figura 7 no que diz respeito à comparação de polarização.

Realizou-se uma análise mais detalhada da função objetivo do estimador ML(2) e foi verificado que o aumento do azimuth do alvo pode levar à ocorrência frequente de dois mínimos locais desta função, como ilustrado no exemplo da Figura 10.

Nota-se nesta figura que a função objetivo utilizada pelo estimador ML(2) apresenta dois valores mínimos muito próximos, associados a valores bastante distin-

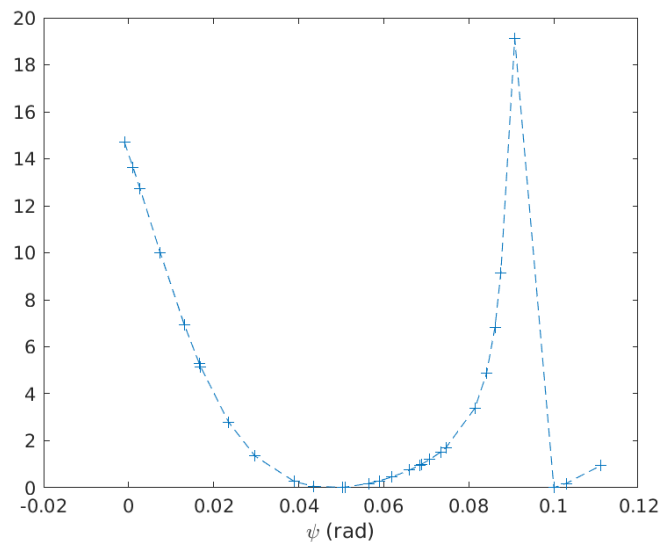
tos de seu argumento, sendo um deles correspondente ao azimuth correto do alvo. Situações semelhantes a esta podem levar à ocorrência de elevados erros de estimação e consequente aumento do EQM.

Figura 9 - Desempenho dos estimadores ML(2) e MA em função do azimuth do alvo com RSR de 20 dB.



Verificou-se, entretanto, que o aumento no número de conformações utilizadas reduz a intensidade deste problema. Os resultados apresentados em seguida ilustram esta constatação.

Fig. 10 - Exemplo de função objetivo utilizada pelo estimador ML(2), obtida com azimuth do alvo em 0,10 rad e 20 dB de RSR.

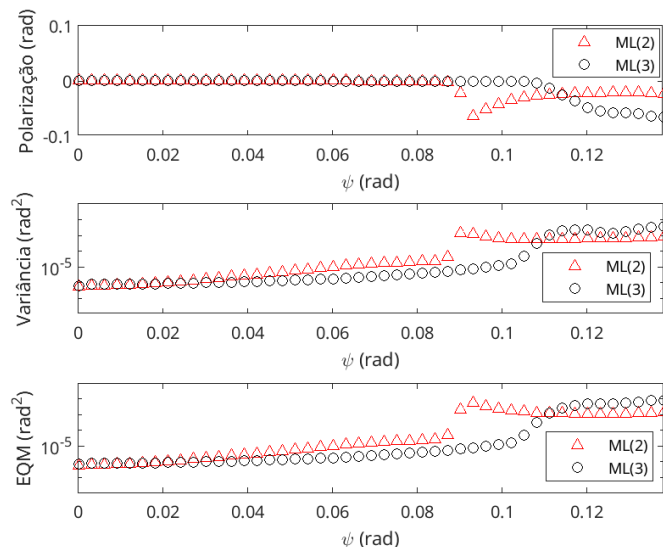


5.2 Aumento do número de conformações

Para implementação do estimador ML(3), utilizou-se uma conformação com inclinação $\psi_\epsilon = 0$ rad e 2 conformações com inclinações $\psi_{\pm\epsilon} = \pm 0,056$ rad. As conformações utilizadas com o ML(2) foram as mesmas já citadas anteriormente.

A Figura 11 mostra os resultados de desempenho obtidos com esses estimadores para uma RSR de 10 dB.

Fig. 11 - Desempenho dos estimadores ML(2) e ML(3) em função do azimuth do alvo com RSR de 10 dB.

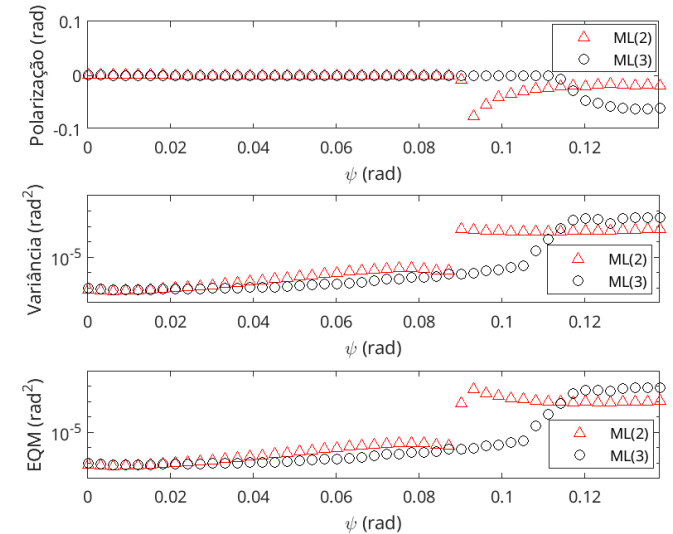


Vê-se que o emprego de 3 conformações possibilita de fato uma melhora na *abrangência* da estimação, proporcionando um desempenho de EQM que permanece fundamentalmente estável até valores de azimuth da ordem de 0,105 rad, o que representa um aumento de aproximadamente 20% em relação à *abrangência* do estimador ML(2).

A Figura 12 apresenta resultados de desempenho dos mesmos estimadores obtidos com RSR de 20 dB. Percebe-se nesta figura melhora decorrente do aumento da RSR e se observa novamente que o estimador ML(3) tem aumento de abrangência em torno de 20%.

Foi possível verificar também, em outras simulações, que ganhos ainda maiores de *abrangência* podem ser obtidos com a estimação ML, se combinada com o emprego de mais de 3 conformações.

Fig. 12 - Desempenho dos estimadores ML(2) e ML(3) em função do azimuth do alvo com RSR de 20 dB.



5.3 Complexidade computacional

Os estimadores ML investigados apresentam desempenho superior ao estimador MA, contudo têm complexidade mais elevada, principalmente pela necessidade de implementação de uma otimização numérica.

Cabe, no entanto, observar que existe espaço para investigação de algoritmos para esta implementação com custo computacional reduzido. Neste trabalho, a otimização foi implementada com o APSO [22], mas outras alternativas existem e podem ser tentadas em trabalhos futuros. Por exemplo, há a possibilidade de implementar uma combinação de técnicas como sugerido em [14], ou a utilização de funções objetivo aproximadas (em relação à função objetivo original), que proporcionem um custo computacional menor para o procedimento de otimização.

Conclusões

Investigou-se o emprego do método de máxima verossimilhança (ML) para estimação de azimuth de um alvo em sistemas radar com arranjo de sensores. No modelo de receptor considerado, o conjunto de sinais na saída do arranjo é submetido a conformações fixas de feixe seguidas de etapas de filtragem e

amostragem, para gerar o vetor de observações a ser usado para estimação de ângulo.

Foi abordado inicialmente um estimador ML capaz de produzir também parâmetros de atraso e amplitude complexa do sinal recebido. Em seguida, procedeu-se à investigação de desempenho de uma versão simplificada deste estimador, voltada apenas para a obtenção do azimuth, utilizando duas conformações de feixe. Comparado à alternativa que faz uso da técnica monopulso, o estimador ML de azimuth aqui avaliado proporciona estimativas precisas em intervalos maiores, porém tem custo computacional mais alto por requerer otimização numérica para obtenção das estimativas.

Avaliou-se adicionalmente o efeito de um pequeno aumento no número de conformações de entrada

empregados para a estimação ML de azimuth e se verificou que a introdução de uma conformação adicional acentua as vantagens de desempenho inicialmente verificadas.

Direções para a continuação desta investigação em trabalhos futuros foram apontadas, visando em particular à redução de complexidade computacional dos estimadores ML. Ainda na perspectiva de continuação do presente trabalho, cabe notar que, admitindo o emprego de um arranjo bidimensional de sensores, a solução ML aqui equacionada pode facilmente ser estendida para contemplar também o ângulo de elevação do alvo. A investigação de desempenho do estimador de posição assim obtido se coloca também como uma alternativa a ser contemplada em trabalhos futuros.

Referências

- [1] MAILLOUX, R. J. Phased array antenna handbook. [S. l.]: Artech House, 2017.
- [2] RICHARDS, M.; SCHEER, J.; HOLM, W. Principles of Modern Radar: Basic Principles. London: Institution of Engineering and Technology, 2010.
- [3] XU, J.; WANG, W. Q.; GUI, R. Computational Efficient DOA, DOD, and Doppler Estimation Algorithm for MIMO Radar. *IEEE Signal Processing Letters*, v. 26, n. 1, p. 44-48, 2019.
- [4] CHAHROUR, H.; DANSEREAU, R.; RAJAN, S.; BALAJI, B. Direction of Arrival Estimation using Riemannian Mean and Distance. *IEEE Radar Conference*, Boston, p. 1-5, 2019.
- [5] SHERMAN, S.; BARTON, D. Monopulse Radar Theory and Practice. [S. l.]: Artech House, 2011.
- [6] JAIN, V.; EHRMAN, L. M.; BLAIR, W. D. Estimating the DOA mean and variance of off-boresight targets using monopulse radar. *IEEE Proceeding of the Thirty-Eighth Southeastern Symposium on System Theory*, p. 85-88, 2006.
- [7] SHARENSEN, S. Angle estimation accuracy with a monopulse radar in the search mode. *IRE Transactions on Aerospace and Navigational Electronics*, n. 3, p. 175-179, 1962.
- [8] GROSSI, E.; LOPS, M.; VENTURINO, L. A search-and-revisit scanning policy to improve the detection rate in agile-beam radars. *IEEE Workshop on Statistical Signal Processing (SSP)*, p. 452-455, 2014.
- [9] GORWARA, A.; MOLCHANOV, P. Multibeam monopulse radar for airborne sense and avoid system. *SPIE Unmanned/Unattended Sensors and Sensor Networks XII*, v. 9986, p. 9-22, 2016.
- [10] DAI, H.; HAN, H.; WANG, J.; XU, X.; QIAO, H. *An improved high angular resolution method by using four-channel jointed monopulse radar*. *IEEE Progress In: Electromagnetics Research Symposium-Spring (PIERS)*, p. 3056-3061, 2017.
- [11] TREES, H. V. Optimum Array Processing: Part IV of Detection, Estimation, and Modulation Theory. London: Wiley, 2004.
- [12] CHANG, D.; ZHENG, B. Adaptive generalized sidelobe canceler beamforming with time-varying direction-of-arrival estimation for arrayed sensors. *IEEE Sensors Journal*, v. 20, n. 8, p. 4403-4412, 2019.
- [13] DAVIS, R.; FANTE, R. A maximum-likelihood beamspace processor for improved search and track. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, v. 49, n. 7, p. 1043-1053, 2001.
- [14] Nickel, U. Overview of generalized monopulse estimation. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, v. 21, n. 6, p. 27-56, 2006.
- [15] Trees, H. V. Detection, estimation, and modulation theory, part I: detection, estimation, and linear modulation theory. London: Wiley, 2004.

- [16] ÖZSOY, V. S.; ÖRKÇÜ, H. H.; BAL, H. Particle swarm optimization applied to parameter estimation of the four-parameter Burr III distribution. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions A: Science*, v. 42, n. 2, p. 895-909, 2018.
- [17] POLI, R.; KENNEDY, J.; BLACKWELL, T. Particle swarm optimization. *Swarm Intelligence*, v. 1, n. 1, p. 33-57, 2007.
- [18] NAJJARZADEH, M.; SADJEDI, H. Implementation of particle swarm optimization algorithm for estimating the innovative parameters of a spike sequence from noisy samples via maximum likelihood method. *Digital Signal Processing*. Amsterdam: Elsevier, 2020.
- [19] GLASS, J. D.; BLAIR, W. Range estimation using adjacent matched filter samples. *IEEE Aerospace Conference*, p. 1-7, 2014.
- [20] WANG, J.; WANG, T.; WU, J. Improved target direction-of-arrival estimation using multiple adjacent beams for airborne phased array scanning radar. *IET Radar, Sonar & Navigation*, v. 12, n. 2, p. 239-243, 2018.
- [21] SCHWAAB, M.; BISCAIA JR, E. C.; MONTEIRO, J. L.; PINTO, J. C. Nonlinear parameter estimation through particle swarm optimization. *Chemical Engineering Science*, v. 63, n. 6, p. 1542-1552, 2008.
- [22] YANG, X. S. Particle swarm optimization. *Nature-Inspired Optimization Algorithms*. [S. l.]: Academic Press, 2021.
- [23] CLERC, M. Beyond standard particle swarm optimization. *Innovations and Developments of Swarm Intelligence Applications*. [S. l.]: IGI Global, 2012.

Uma revisão sobre materiais a serem empregados em placas balísticas do tipo *stand alone* conforme Requisitos Operacionais Conjuntos do Ministério da Defesa

Jeremias Fortini^{*1}, Frederico Dal Berto², Altair Soria Pereira², Eduardo Sousa Lima¹

¹ Instituto Militar de Engenharia, Praça General Tibúrcio, 80, 22290-270. Paia Vermelha, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² Instituto de Física e Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Avenida Bento Gonçalves, 9500, 91501-970, Agronomia, Porto Alegre, RS, Brasil.

*fortini@ime.eb.br

RESUMO: O desenvolvimento de materiais balísticos resistentes a novas ameaças é um tema de grande preocupação no cenário global. Em 2018, o Ministério da Defesa estabeleceu os Requisitos Operacionais Conjuntos (ROC) para os materiais de proteção balística das Forças Armadas. A Base Industrial de Defesa não apresentou, até o momento, solução balística para alguns dos calibres levantados. Neste cenário, tem-se optado por equipamentos que permitam uma maior mobilidade ao usuário, aliada à proteção contra calibres de maior energia cinética. Assim, o presente artigo tem por finalidade apresentar uma revisão sobre materiais para comporem um Sistema de Blindagem de Multicamadas (SBM) para placas do tipo *stand alone* para coletes de assalto, além de apresentar as normas e condições para avaliação de materiais balísticos adotadas em âmbito interno e internacionalmente.

PALAVRAS-CHAVE: Placa balística. *Stand alone*. SBM. Requisitos Operacionais Conjuntos (ROC).

ABSTRACT: The development of ballistic materials resistant to new threats is a topic of great concern on the global stage. In 2018, the Ministry of Defense established the Joint Operational Requirements (JOR) for the Armed Forces' ballistic protection materials. Until now, the Defense Industrial Base has not presented a ballistic solution for some of the calibers surveyed. In this scenario, equipment has been chosen that allow greater mobility for the user combined with protection against calibers with greater kinetic energy. Thus, this article aims to present a review of materials to compose a Multilayer Armor System (MAS) for *stand alone* plates for assault vests, in addition to presenting the standards and conditions for evaluating ballistic materials adopted in the context of domestically and internationally.

KEYWORDS: Ballistic plate. *Stand alone*. MAS. Joint Operational Requirements (JOR).

1. Introdução

A evolução da humanidade pode ser descrita por meio das batalhas travadas pelas suas diversas civilizações, em que os avanços científicos e tecnológicos tiveram um papel fundamental na determinação dos seus vencedores. Os persas foram os primeiros povos a se preocuparem com a proteção individual, quando passaram a usar coletes de palha [1]. Ao longo dos séculos, diversas foram as evoluções desses dispositivos, que são representados atualmente como coletes e capacetes de proteção balística, denominados como equipamentos de proteção balística individual [2]. Esses equipamentos podem ser confeccionados em diversos tipos de ma-

téria-prima, como metais, polímeros, cerâmicos, materiais compósitos, incluindo aqueles formados por fibras naturais, que pelas suas combinações geram produtos que podem ser representados em quatro parâmetros principais de avaliação: nível de proteção, vida útil, peso e custo [3].

Os materiais metálicos foram os precursores na blindagem individual, as ligas de cobre foram substituídas por materiais ferrosos, no entanto o alto peso específico desses materiais acabou sendo um empecilho na continuidade da sua aplicação em blindagens individuais. Atualmente, os materiais metálicos são empregados em soluções em que o peso não se torna um fator determinante da sua utilização. Exemplo disso são as suas aplicações em carros de combate,

viaturas blindadas, navios e aeronaves militares, onde há resistência ao impacto, resistência à tração, ductilidade e dureza [4-5].

Os materiais poliméricos revolucionaram os equipamentos de proteção balística individual através do desenvolvimento do Kevlar®, na década de 70, uma sintética de para-aramida com estrutura molecular complexa que possui baixa densidade e resistência específica superior ao aço [6]. O polietileno de ultra-alto peso molecular (UHMWPE)

Os cerâmicos são extremamente duros e resistentes à compressão e ao desgaste. Quando utilizados em materiais balísticos, são aplicados na camada mais externa da proteção, pois a sua elevada dureza permite a erosão e o estilhaçamento de projéteis, aumentando a área impactada entre projéteis e armaduras e dissipando a carga do impacto. Além disso, a cerâmica quebrada causa erosão mútua com os projéteis, produzindo forças laterais que impactam no fluxo e impedindo a maior penetração [7]. Os materiais cerâmicos mais utilizados em blindagens balísticas individuais são a alumina (Al_2O_3), o carbetto de boro (B_4C), o carbetto de silício (SiC) e o nitreto de silício (Si_3N_4), que possuem grande variação em suas propriedades e custos de processamento [8-9].

Os materiais cerâmicos podem ser aplicados em conjunto com materiais com maiores ductilidade, como lâminas de fibras de aramida (como o Kevlar) ou lâminas de polietileno de ultra-alto peso molecular (UHMWPE) [10], formando um Sistema de Blindagem de Multicamadas (SBM). As fibras e os polímeros têm maior tenacidade, força específica, módulo específico, resistência à fadiga, resistência ao desgaste e absorção de choque em comparação com os cerâmicos, e, quando usadas como material na parte traseira das placas cerâmicas, agem em conjunto, retardando a tração do material cerâmico, servindo de suporte para os estilhaços, possibilitando maior perda de energia cinética [11].

Inúmeros países possuem as suas normas de classificação de níveis de proteção balística e de realização dos ensaios balísticos. As normas que possuem maior reconhecimento neste cenário são do Instituto Nacional de Justiça dos Estados Unidos (NIJ - *National Institute*

of Justice). No entanto, essas normas são direcionadas para materiais balísticos a serem utilizados por Órgãos de Segurança Pública e Privada, não abrangendo possíveis ameaças em que as FA podem ser empregadas nos variados Teatros Operacionais, tanto que as diferentes Forças Armadas dos Estados Unidos possuem as suas normas específicas [12]. Até 2018, as Forças Armadas brasileiras utilizavam apenas as normas NIJ para definição dos níveis de proteção a serem adotados. No entanto, por meio da Portaria Normativa nº 14/MD, de 23 de março de 2018, foram definidos os Requisitos Operacionais Conjuntos (ROC) [13] para os materiais balísticos a serem adotados pelas três forças (Exército, Marinha e Aeronáutica) [14].

Considerando os novos requisitos e as novas exigências estratégicas estabelecidas pelo Ministério da Defesa, denominados *Requisitos Operacionais Conjuntos (ROC)*, nos quais são previstos a adoção de coletes balísticos resistentes aos calibres 5,56 x 45 mm (M855/SS109) e 7,62 x 39 mm MSC (*mild steel core*) (M43) [13], com dimensões e peso definidos, a presente revisão pretende apresentar potencialidades de materiais para aplicação em uma solução balística, do tipo SBM, para que sejam utilizados como placas *stand alone* em coletes de assalto. As placas *stand alone* são peças íntegras de 250 x 300 mm que, sem a conjugação de nenhum outro tipo de proteção, oferecem a proteção balística no nível desejado. Uma solução de SBM para compor essas placas é constituída pela primeira camada de material cerâmico e a segunda camada à base de material polimérico. Dentro desse escopo de materiais, serão apresentados diversos materiais postulantes para essa composição.

2. Proteção balística individual

2.1 Evolução

Ao longo dos séculos, as guerras foram determinantes para a expansão ou a extinção de inúmeras nações, sendo responsáveis diretamente pela evolução da humanidade em diversos campos, principalmente nas descobertas científicas [15].

Com a evolução dos cenários de batalhas, o homem sentiu a necessidade de cada vez mais aprimorar a sua proteção. Os persas, então, desenvolveram coletes de palha, que serviam para proteção contra flechas e impacto. Esses dispositivos foram aprimorados pelos gregos e romanos, que utilizaram cobre e bronze, conforme observado na **Figura 1** [16].

Fig. 1 - Armadura romana.



Fonte: [16].

A primeira versão de equipamento para proteção balística, que se assemelha aos modelos atuais, dando mobilidade ao usuário, é datada do século XVIII, na Coreia, onde foi desenvolvida uma vestimenta a partir de camadas de algodão em quantidade suficiente para proteger das armas de fogo da época, como observado na **Figura 2** [17]. No Japão, foram produzidas peças com trinta camadas de seda que proporcionavam proteção contra projéteis disparados por armas que utilizavam pólvora negra como propelente

[1]. No século XIX, foram desenvolvidos os coletes à base de materiais metálicos, mas ainda apresentavam um peso muito elevado, prejudicando a mobilidade do usuário [18-19].

Fig. 2 - Proteção balística coreana do século XVIII.



Fonte: [17].

Em 1902, em Chicago, nos Estados Unidos da América, foi desenvolvida uma vestimenta composta por uma mescla de chapas de metal de 1,6 mm entre quatro camadas de seda. Esse dispositivo tinha peso inferior a um quilograma e fornecia proteção para calibre .44 [18]. Esse produto se tornou um sucesso para a época; no entanto, o calor e o alto custo, devido à quantidade de seda aplicada, fizeram com que o Exército norte-americano desaprovasse tal equipamento para uso de suas tropas [19].

Na Primeira Guerra Mundial, os americanos equiparam os seus soldados com uma peça combinada que cobria o torso e a cabeça, o *Brewster Body Shield*. Era um equipamento construído à base de uma liga metálica de cromo e níquel, que fornecia proteção contra tiros de rifle, mas pesava cerca de vinte quilos [19].

Em 1918, ocorreu a primeira notícia da aplicação de materiais cerâmicos com finalidade balística, diferente

de todos os modelos desenvolvidos até o momento, que eram compostos de metais ou de fibras naturais na forma de tecidos. O *major* inglês Neville Monroe Hopkins descobriu que a aplicação de uma fina camada de esmalte na superfície do aço laminado aumentava a resistência à penetração das placas balísticas [20].

Na Segunda Guerra Mundial, os tripulantes de bombardeiros utilizaram um colete que protegia todo torso e o assento dos militares (**Figura 3**) [21].

Fig. 3 - Modelo de colete e capacete balísticos utilizados pela tripulação em bombardeiros.



Fonte: [21].

Os soldados americanos que foram enviados para as guerras da Coreia e do Vietnã fizeram o uso das *flak jackets*, que eram jaquetas acolchoadas confeccionadas de placas de fibra de vidro em lâminas, *nylon* e alumínio, e tinham por objetivo defender os militares dos estilhaços de granadas. No entanto, a pouca eficácia e o grande peso tornaram este equipamento inviável após a criação de materiais mais leves e eficientes como o Kevlar [1, 22].

Foram os norte-americanos os pioneiros no emprego da proteção balística para forças policiais. O aumento dos casos de homicídios de agentes de segu-

rança na década de 1960 motivou o governo dos Estados Unidos, através do *National Institute of Justice* (NIJ), a desenvolver um colete de proteção balística para uso policial. A NIJ se tornou desde então o órgão de referência mundial na classificação dos níveis de proteção balística, bem como testes e instruções normativas acerca de coletes balísticos e blindagens de uso pessoal [1, 22].

Ainda na década de 1960, surgiram as fibras artificiais de aramida para aplicação balística, que foram responsáveis pela revolução dos equipamentos de proteção. Nessa época, a empresa norte-americana DuPont® desenvolveu o Nomex® para substituir o metal em pneus de carros de corrida e em seguida o Kevlar®, que chegou ao mercado em 1970, sendo essa a fibra sintética mais utilizada em proteção balística até os dias atuais [23]. A aramida combina resistência, baixa massa específica e flexibilidade, que possibilitou um avanço sem precedentes na produção dos coletes balísticos modernos [24].

Na década de 1970, foram desenvolvidos materiais cerâmicos para proteção balística que tinham como objetivo reduzir o peso das blindagens individuais e de aeronaves (**Figura 4**) [25]. Nessa ocasião, foram desenvolvidas placas balísticas à base de alumina e de carbeto de boro obtidas por prensagem a quente e por sinterização em fase líquida [26].

Fig. 4 - Coletes balísticos com insertos de materiais cerâmicos utilizados pelos americanos na Guerra do Vietnã.





Fonte: [25].

Na década de 1980, foram desenvolvidas placas cerâmicas maiores com aplicação em proteção veicular. Nessa década, foi desenvolvido pelo exército americano o *Personnel Armor System for Ground Troops* (PASGT, ou Sistema de Blindagem Pessoal para Tropas Terrestres), que foi um importante sistema de proteção balística utilizado pelos americanos nas décadas de 1980 e 1990 [27] (**Figura 5**) [28].

Fig. 5 - Colete balístico modelo PASGT.



Fonte: [28].

Os modelos de coletes atuais, por meio do aperfeiçoamento das suas matérias-primas, se adaptam à

missão a qual o militar será empregado, podendo oferecer maior ou menor área coberta, e níveis maiores ou menores de proteção, contrapondo sempre com a mobilidade necessária no combate, pois, quanto maior a área coberta e o nível de proteção, menor a mobilidade do militar. Tanto que os materiais utilizados por agentes de grupos antibombas protegem o corpo inteiro (**Figura 6**) [30], enquanto os operadores de tropas especiais, adotam os coletes de assalto, que possuem apenas insertos de alto nível de proteção balística frontal e dorsal [29].

Fig. 6 - Vestimenta antibombas.



Fonte: [30].

Nesse contexto, o Exército norte-americano utiliza o conceito de colete modular, denominado *Improved Outer Tactical Vest* (IOTV), que pode agregar ou retirar acessórios conforme o tipo de operação (**Figura 7**) [27, 31]. Para missões em que exigem o máximo de mobilidade, é utilizado o *Soldier Plate Carrier System* (SPCS) (**Figura 8**) [32], que foi idealizado para reduzir o peso carregado pelos militares em missões específicas [27].

Fig. 7 - Colete modular americano IOTV.



Fonte: [31].

Fig. 8 - Colete de assalto americano SPCS.



Fonte: [32].

2.2 Colete de proteção balística nacional

O modelo de colete balístico adotado desde 2004 pelo Exército Brasileiro (EB) e pelas demais FA brasileiras é do tipo *Outer Tactical Vest* (OTV), que é o modelo anterior ao IOTV adotado pelas tropas norte-americanas, que foi desenvolvido nos anos 2000 pelos americanos em substituição ao modelo PASGT [33].

O colete adotado pelo Exército brasileiro possui o sistema de abertura frontal, conforme a **Figura 9**, sendo composto de uma capa, um painel balístico frontal esquerdo, um painel balístico frontal direito, um pai-

nel balístico dorsal, uma placa balística frontal e uma placa balística dorsal. Podem compor ainda o colete: acessórios, protetor de pescoço (ou gola), protetor pélvico, protetor glúteo e protetores de ombros.

Fig. 9 - Imagem frontal (c) e dorsal (d) do colete adotado pelo EB.



3. normas para classificação e realização de ensaios balísticos

A proteção especificada para o colete do Exército brasileiro é de nível III da NIJ 0101.04 [34], obtido por meio da atuação conjunta dos painéis e das placas balísticas, enquanto os painéis balísticos isoladamente proporcionam o nível de proteção III-A, não sendo permitida a utilização das placas balísticas sem o uso dos painéis. Os painéis balísticos (flexíveis) são inseridos em bolsos internos da capa, enquanto as placas (rígidas) são inseridas nos bolsos externos da capa do colete.

As placas *stand alone* (**Figura 10**) [36] podem ser utilizadas nos coletes de assalto (**Figura 8**), que são equipamentos nos quais a relação área de cobertura x mobilidade é diminuída, mas, em compensação, buscam-se maiores níveis de proteção para a região coberta. Esse tipo de colete é denominado *Plate Carrier*, ou Porta Placa [35]. Esse formato é muito utilizado por tropas que são empregadas em ações de iminente enfrentamento com o inimigo, como no caso de tropas de Forças Especiais em missões de assalto e resgate.

Fig. 10 - Placa Balística *stand alone*.



Fonte: [36].

A definição das características dos equipamentos adotados pelos militares do Exército brasileiro deve seguir os requisitos elaborados pelos Órgãos de Direção-Geral (ODG) em consulta e coordenação com os Órgãos de Direção Setorial (ODS) e o Órgão de Direção Operacional (ODOp).

O colete balístico é considerado um Material de Emprego Militar (MEM), e assim ele deve obedecer ao previsto pelo Ciclo de Vida dos Sistemas e Materiais de Emprego Militar (SMEM), normatizado pela Portaria do Comandante do Exército nº 233, de 15 de março de 2016, que aprovou as Instruções Gerais para a Gestão do Ciclo de Vida dos Sistemas e Materiais de Emprego Militar (EB10-IG-01.018), 1ª Edição, 2016. O processo de desenvolvimento de um novo material se concentra na primeira e na segunda fase das quatro previstas do Ciclo de Vida do MEM, que são [37]:

- 1ª fase: formulação conceitual;
- 2ª fase: obtenção;
- 3ª fase: produção, utilização e manutenção;
- 4ª fase: desativação.

Na **Tabela 1**, são apresentados sumariamente os principais documentos previstos na EB10-IG-01.018 para a primeira fase do Ciclo de Vida do SMEM [37].

Tab. 1 - Documentos elaborados na fase de formulação conceitual

| Fase | Documento | Finalidade | Órgão responsável |
|-----------------------|---|---|---|
| Formulação Conceitual | Compreensão das Operações (COMOP) | Documento que contém informações necessárias para orientar a concepção integrada de SMEM, tais como: a missão, o ambiente operacional, os tipos de operações, as funcionalidades a serem executadas e as intenções (desempenho esperado). | EME |
| | Condicionantes Doutrinárias e Operacionais (CONDOP) | Documento que contém os parâmetros que definem o emprego e o desempenho esperado de determinado MEM, considerando a Doutrina Militar Terrestre. Esse documento constitui a base para a elaboração dos Requisitos Operacionais (RO) | Centro de Doutrina do Exército (C Dout Ex/ COTER) |

| Fase | Documento | Finalidade | Órgão responsável |
|------------|-------------------------------|---|-------------------|
| Formulação | Requisitos Operacionais (RO) | Documento que segue as condicionantes doutrinárias e operacionais no processo de obtenção de um MEM, que lhe consubstancia as características restritas aos aspectos operacionais. | 4ª Sch do EME |
| | Conceitual | Documento que decorre dos RO e consiste na fixação das características técnicas, logísticas e industriais que o sistema ou material deverá ter para cumprir os requisitos operacionais. | DCT e COLOG |
| | Mapa de Tecnologias (MAPATEC) | Documento que indica as tecnologias necessárias para obtenção de um sistema ou material por PD&I, bem como o fluxo para obtê-las, em ordem cronológica. | DCT |

Fonte: [37].

Após a elaboração de toda a documentação citada na **Tabela 1**, o Estado Maior do Exército (EME) convoca os ODS para realizar a Primeira Reunião Decisória (1ª RD) que determinará o prosseguimento ou não do ciclo de vida para a fase de obtenção, que terá início com a ordem emanada na 1ª RD, para que seja dado prosseguimento à obtenção dos SMEM, por intermédio de projetos de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PD&I) e/ou aquisição, após inclusão destes no portfólio de projetos do Exército Brasileiro [37].

No caso de obtenção por PD&I, procura-se obter um protótipo, e, posteriormente, o lote piloto do sistema ou material com as características técnicas e operacionais desejadas, por meio das seguintes etapas:

- obtenção do protótipo;
- avaliação do protótipo;
- produção do lote piloto; e
- avaliação do lote piloto.

Na obtenção por aquisição, o SMEM pode ser adquirido no mercado interno ou externo, para atender às necessidades levantadas, sendo prevista uma avaliação específica, na qual se verifica a conformidade do sistema ou material a ser adquirido com os padrões e as exigências técnicas, operacionais e logísticas estabelecidas pelo EB durante a 1ª RD.

Concluída a etapa de obtenção, seja por projeto de PD&I e/ou aquisição, e atestada a conformidade do sistema ou material avaliado, realiza-se a Segunda Reunião Decisória (2ª RD), que encerra essa fase, determinando a execução, ou não, da experimentação doutrinária para o sistema ou material, bem como sua adoção e o prosseguimento para a fase de produção, utilização e manutenção [37].

Em suma, para o desenvolvimento de um novo produto, diversos órgãos do Exército são mobilizados, gerando em conjunto os documentos elencados na **Tabela 1**. Entre os documentos elencados destacam-se o RO, pois é nesse documento em que serão definidas as características gerais do produto, como para o caso dos coletes balísticos, modelo, formato, tamanho, peso, níveis de proteção, entre outros, para que, basicamente, nos RTLI sejam levantadas as condições de avaliação dos requisitos levantados [37].

Para o MEM colete de proteção balística, os seguintes documentos foram elaborados conforme previsto na EB10-IG-01.018 [37]:

- COMOP nº 03/2018, do Sistema Combatente Brasileiro (COBRA), publicada pela Portaria nº 156-EME, de 13 de agosto de 2018;

- CONDOP nº 017/2018) - do Sistema Combatente Brasileiro (COBRA), publicada pela Portaria nº 090, de 20 de agosto de 2018;
- RO nº 32/2019 – colete balístico-tático, publicada pela Portaria nº 054-EME, de 13 de março de 2019;
- RTLI do colete balístico-tático, publicada pela Portaria nº 088-EME, de 27 de março de 2019;
- MAPATEC do colete balístico-tático, documento interno do Departamento de Ciência e Tecnologia.

Além dos documentos listados acima, quando um produto for comum às três Forças Armadas, o Ministério da Defesa poderá emitir documentação para padronização de requisitos, que são denominados de Requisitos Operacionais Conjuntos (ROC). Por meio da Portaria Normativa nº 14/MD, de 23 de março de 2018, foram definidos os ROC, para, entre outros materiais, colete balístico e placa balística *stand alone*. Dessa forma, os RO publicados em 2019 possuem praticamente os mesmos parâmetros levantados pelo ROC de 2018, com a ressalva de que, para a placa *stand alone*, até o momento, existe apenas o ROC [13].

Os requisitos levantados para o colete balístico e para placa no RO e/ou no ROC são divididos em Requisitos Absolutos, que são aqueles que determinado MEM deverá possuir obrigatoriamente, e Requisitos Desejáveis, que são aqueles que poderão ser solicitados ou não aos fabricantes, conforme solicitação do solicitante por ocasião da obtenção. Os Requisitos Absolutos para os coletes e placas *stand alone* contemplam os seguintes calibres para proteção balística [13]:

- a. .44 Magnum SJSP;
- b. 9 x 19 mm Luger;
- c. 5,56 x 45 mm (M193) (núcleo de chumbo);
- d. 7,62 x 39 mm FMJ (núcleo de chumbo);
- e. 7,62 x 51mm FMJ (M80).

Tais calibres correspondem ao nível de proteção III da NIJ 0101.06 [38] ou RF1 da NIJ 0123.00 [39], conforme será visto na seção 3.

Os calibres solicitados nos Requisitos Desejáveis dos coletes e placas, que correspondem ao nível RF2 da NIJ 0123.00, são os seguintes [13]:

- a. 7,62 x 39 mm MSC (M43);
- b. 5,56 x 45 mm (M855/SS109); e
- c. 7,62 x 51 mm AP.

Esses calibres correspondem, respectivamente, aos níveis especiais da NIJ 0101.06, conhecidos no mercado como “III+” e “III++”, sendo o último equivalente ao nível IV da NIJ 0101.06 [38].

Assim, fruto da demanda apontada pelo Ministério da Defesa e corroborada pelo Exército brasileiro, conforme os ROC e RO, respectivamente, é importante aprofundar em estudos que apresentem a possibilidade de uma solução balística de fabricação que atenda aos requisitos levantados.

Destaca-se, então, que não existe nenhum produto de fabricação nacional que atenda aos requisitos desejáveis levantados. Esses calibres são considerados como importantes ameaças no Teatro de Operações onde o EB é empregado. O calibre 7,62 x 39 mm MSC (M43) é utilizado pelo armamento AK47 e o 5,56 x 45 mm SS109 pode ser utilizado pelo próprio armamento de dotação do EB, o Fuzil de Assalto 5,56 IA2, que foi adotado em 2013 por meio da Portaria nº 211-EME, de 23 de outubro de 2013 [40].

De acordo com o Regulamento de Produtos Controlados, aprovado pelo Decreto nº 10.030, de 30 de setembro de 2019 [41] e pela Portaria nº 18 – D LOG, de 19 de dezembro de 2006, que aprova as Normas Reguladoras da avaliação técnica, fabricação, aquisição, importação e destruição dos materiais balísticos [43]. Conforme esses documentos, os níveis de proteção adotados no Brasil seguem o descrito na NIJ 0101.04 [34], demonstrados na **Tabela 2**, em que os níveis I a III-A que podem ser comercializados para o uso geral, enquanto os níveis III e IV só podem ser comercializados para Forças Armadas e demais Órgãos de Segurança Pública devidamente autorizados pelo Comando do Exército, sendo considerados restritos (RTO).

No Artigo 8º da Portaria 18 [43], é determinado que os coletes balísticos desenvolvidos no Brasil sejam avaliados no Centro de Avaliações do Exército (CAEx) baseando-se na norma do NIJ 0101.04 [34]. O Artigo 12º, por sua vez, estabelece que as placas balísticas, destinadas a proverem o nível de proteção desejado, poderão ser testadas e comercializadas, se cumprirem as dimensões mínimas previstas na NIJ 0101.04 [34].

Para proteção contra os calibres dos níveis I a III-A, não existe a necessidade de utilização de placas balísticas, pois os painéis balísticos corretamente dimensionados oferecem a proteção balística ao

usuário. Por outro lado, para a proteção aos calibres dos níveis III e IV, é necessária a utilização de placas balísticas atuando isoladas ou em conjunto com os painéis balísticos.

Tab. 2 - Níveis de proteção estabelecidos na NIJ 0101.04

| Nível | Munição | Velocidade (m/s) | Massa do projétil | Grau de restrição |
|-------|-----------------------|------------------|-------------------|-------------------|
| I | .22 caliber LR LRN | 329 | 2,6 g 40 gr | PERMITIDO |
| | .380 ACP FMJ RN | 322 | 6,2 g 95 gr | |
| II-A | 9mm FMJ RN | 341 | 8 g 124 gr | |
| | 40 S&W FMJ | 322 | 11,7 g 180 gr | |
| II | 9mm FMJ RN | 367 | 8 g 124 gr | |
| | .357 Magnum JSP | 436 | 10,2 g 158 gr | |
| III-A | 9mm FMJ RN | 436 | 8,2 g 124 gr | RTO |
| | .44 Magnum SWC Chumbo | 436 | 15,6 g 240 gr | |
| III | 7,62x51mm – NATO FMJ | 847 | 9,6 g 148 gr | |
| IV | .30 Caliber M2 AP | 878 | 10,8 g 166 gr | |

Fonte: [34]

A avaliação dos níveis balísticos realizada conforme a NIJ 0101.04 consiste em impactar o material balístico a ser testado por meio da munição do nível pretendido, carregada com uma quantidade de pólvora que atenda à velocidade especificada na norma. A massa do projétil é apresentada em gramas, unidade do Sistema Internacional (SI), e em *grains* (gr), que é a unidade utilizada usualmente nas balanças de recarga, sendo os projéteis geralmente medidos em incrementos de 1 gr, e as cargas de pólvora medidas em incrementos de 0,1 gr [34].

As munições utilizadas não são encontradas no mercado na configuração dos testes, pois nesse caso são utilizadas as pontas (projéteis) específicas, confor-

me o calibre, com o carregamento manual (**Figura 11**) ou automatizado do estojo com a quantidade de pólvora necessária para atingir a velocidade do teste.

Antes do início da realização do teste balístico, é necessário calibrar corretamente a quantidade de pólvora a ser utilizada no ensaio, de tal forma que aqueles impactos em que a velocidade estiver fora da tolerância da velocidade sejam invalidados. A velocidade é medida por meio de dois sensores ópticos instalados ao longo da trajetória e separados entre si pela distância C, conforme a **Figura 12**.

O componente do colete a ser testado será fixado na vertical com a ação de fitas elásticas sobre o material de apoio (BMF – *Backing Material Fixture*), que

possui densidade semelhante à do corpo humano, e tem por objetivo simular o impacto que o corpo humano sofreria caso fosse alvejado nas condições de ensaio.

Fig. 11 - Equipamento de carregamento manual.



O material de apoio especificado pela NIJ 0101.04 é de argila moldável, denominado plastilina. A NIJ

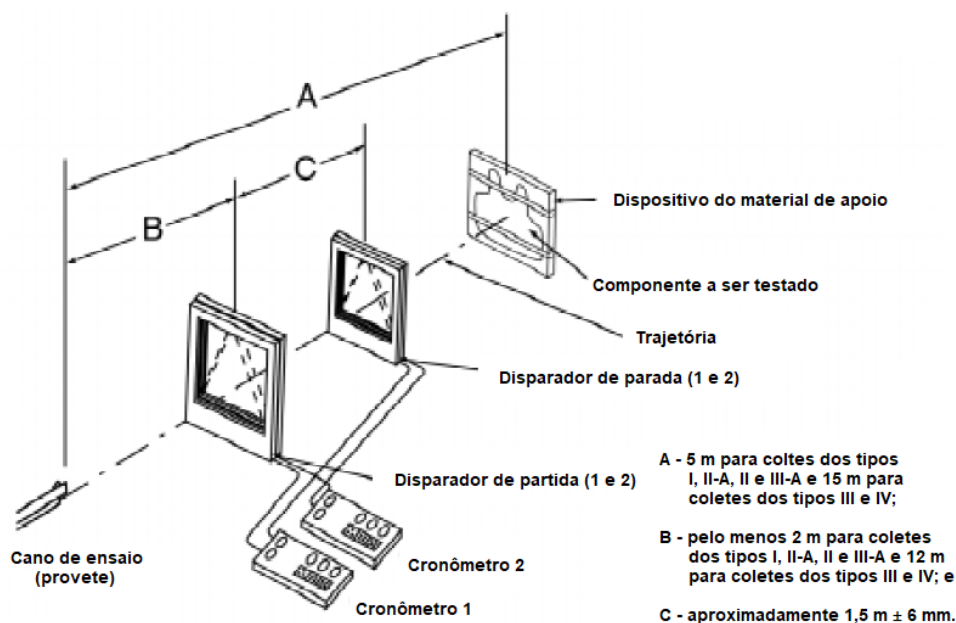
determina que seja utilizada a plastilina da marca ROMA® nº 1. A sua densidade é rigorosamente testada antes, durante e após a realização dos testes [34].

Após o disparo da munição por meio da ação do provete e o impacto do projétil, o colete balístico é analisado e classificado como perfuração total (*complete*), em que o projétil atravessa o material testado, sendo possível verificar a presença de fragmentos da munição no material de apoio, ou como perfuração parcial (*partial*), em que o projétil somente deforma o material testado, sem transpassá-lo [34].

Para os resultados classificados como perfuração parcial, é medida a deformação causada pelo impacto balístico por meio da indentação da plastilina (trauma). A NIJ 0101.04 estabelece como deformação máxima no material, para aprovação, o limite de 44 mm de trauma [34]. Na **Figura 13**, é possível observar como é realizada a indentação no material de apoio [34].

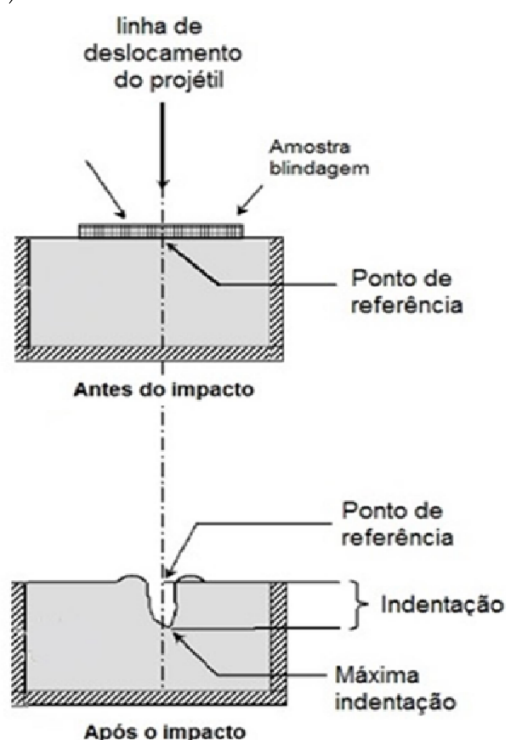
Cabe destacar que, embora a NIJ 0101.04 ainda esteja vigente, diversos países utilizam a versão mais recente para avaliação da resistência balística de coletes balísticos, que é a norma NIJ 0101.06, em vigor desde junho de 2008 [38].

Fig. 12 - Configuração do teste balístico conforme a NIJ.



Fonte: [34].

Fig. 13 - Verificação do desempenho balístico através da medida do trauma em um material de apoio (plastilina).



Fonte: [34].

Tanto os níveis de proteção quanto os mecanismos de avaliação da NIJ 0101.04 [34] e NIJ 0101.06 [38] são semelhantes. Quanto aos níveis de proteção, na NIJ 0101.06 [38] foi descartado o nível de proteção I. Os demais níveis permaneceram com os mesmos calibres, mas houve a alteração da velocidade de teste para alguns deles, com o intuito de garantir maior segurança ao usuário (**Tabela 3**).

Em relação aos testes de avaliação, o número de amostras testadas na NIJ 0101.06 é bem superior ao da NIJ 0101.04. Enquanto para a avaliação do nível III pela NIJ 0101.04 [34] são necessárias 4 amostras, na NIJ 0101.06 [38] são necessárias 14 amostras.

Outra situação não prevista na NIJ 0101.04 [34] é a realização do teste do material submetido a condições adversas de umidade, temperatura e dano mecânico. A NIJ 0101.06 [38] prevê que as amostras sejam submetidas a um ciclo de 10 dias dentro de um tambor rotativo, na temperatura de 70°C e umidade relativa de 90%. Esse equipamento, que pode ser observado na **Figura 14**, é denominado *Tumbler*.

Tab. 3 - Níveis de proteção estabelecidos na NIJ 0101.06

| Nível | Munição | Velocidade (m/s) | Massa do projétil | Grau de restrição |
|-------|----------------------|------------------|-------------------|-------------------|
| II-A | 9mm FMJ RN | 355 | 8 g 124 gr | PERMITIDO |
| | 40 S&W FMJ | 325 | 11,7 g 180 gr | |
| II | 9mm FMJ RN | 379 | 8 g 124 gr | |
| | .357 Magnum JSP | 408 | 10,2 g 158 gr | |
| III-A | .357 SIG FMJ FN | 448 | 8,1 g 125 gr | |
| | .44 Magnum SJHP | 408 | 15,6 g 240 gr | |
| III | 7,62x51mm – NATO FMJ | 847 | 9,6 g 148 gr | RTO |
| IV | .30 Caliber M2 AP | 878 | 10,8 g 166 gr | |

Fonte: [38].

Fig. 14 - Equipamento Tumbler utilizado na avaliação de coletes balísticos pela NIJ 0101.06.



Fonte: [46].

Em outubro de 2023 foi publicada a NIJ 0101.07, que utiliza a também publicada em outubro de 2023, NIJ 0123.00, para estabelecer os novos níveis de proteção balística adotados pelo Instituto de Justiça Americano. Os níveis da NIJ 0123.00 são divididos em proteção balística para blindagem flexível (NIJ HG1 e NIJ HG2) e proteção balística para blindagem rígida (NIJ RF1, NIJ RF2 e NIJ RF3), conforme pode ser observado na **Tabela 4** [39].

Assim como ocorreu na NIJ 0101.06 [38], na NIJ 0101.7 [39], houve o aumento considerável da quantidade de amostras para a avaliação de coletes. Para o nível NIJ RF 1, que equivale ao nível III da NIJ 0101.06 [38], serão necessárias pelo menos 39 amostras, em vez das 14 amostras da NIJ 0101.06 [38].

Tab. 4 - Níveis de proteção previstos na NIJ 0123.00 [39].

| Nível | Munição | Velocidade (m/s) | Massa do projétil | Grau de restrição |
|---------|--------------------------|------------------|-------------------|-------------------|
| NIJ HG1 | 9mm FMJ RN | 398 | 8g 124 gr | PERMITIDO |
| | .357 Magnum JSP | 436 | 10,2 g 158 gr | |
| NIJ HG2 | 9mm FMJ RN | 448 | 8 g 124 gr | |
| | .44 Magnum JHP | 436 | 15,6 g 240 gr | |
| NIJ RF1 | 7,62x51mm – M80 NATO FMJ | 847 | 9,6 g 148 gr | |
| | 7,62x39mm Surrogate | 725 | 7,9 g 122 gr | |
| | 5,56mm M193 BT | 990 | 3,6 g 56 gr | |
| NIJ RF2 | 7,62x51mm – M80 NATO FMJ | 847 | 9,6 g 148 gr | RTO |
| | 7,62x39mm Surrogate | 725 | 7,9 g 122 gr | |
| | 5,56mm M193 BT | 990 | 3,6 g 56 gr | |
| | 5,56mm M855 BT | 950 | 4 g 62 gr | |
| NIJ RF3 | .30 Caliber M2 AP FMJ | 878 | 10,8 g 166 gr | |

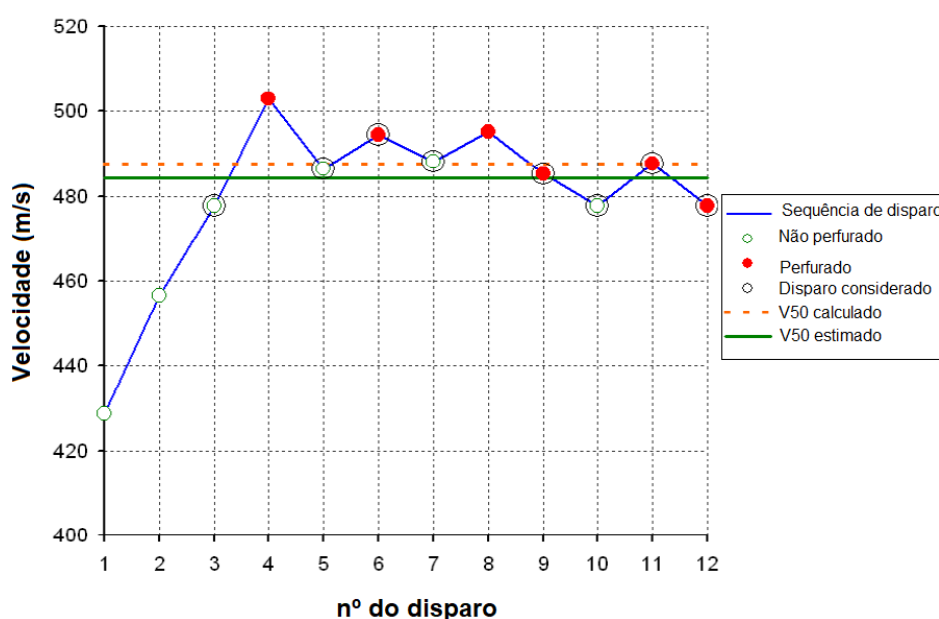
Fonte: [39].

O limite balístico é um parâmetro avaliado desde a NIJ 0101.04 [34] e permanece nas normas NIJ até a atualização mais recente. Para a avaliação desse parâmetro, utiliza-se como norma de apoio a MIL STD 662F [44], utilizando o conceito do V50.

O teste é realizado por meio de disparos sucessivos aumentando e reduzindo a velocidade do projétil, conforme o material é perfurado ou não, até que seja determinada a velocidade conhecida como “limite

balístico”, na qual a probabilidade de perfuração do novo disparo é de 50%. Esse conceito é muito utilizado para diferenciar materiais balísticos de um mesmo nível de proteção, pois, quanto maior o limite balístico de determinado material, mais segurança ele será capaz de proporcionar em elevadas velocidades, inclusive acima das velocidades de testes padronizadas. Na **Figura 15**, é possível observar a simulação da realização de um teste de limite balístico [44].

Fig. 15 - Simulação da realização de um teste para avaliar o limite balístico de um material.



Fonte: [45].

4. Fibras poliméricas de alto desempenho para aplicação balística

As fibras e os tecidos foram os principais responsáveis pelo avanço mais significativo das blindagens individuais nos últimos 20 anos, muito em virtude do aperfeiçoamento dos processos de fabricação do polietileno de ultra-alto peso molecular (UHMWPE) e das fibras de aramida [12].

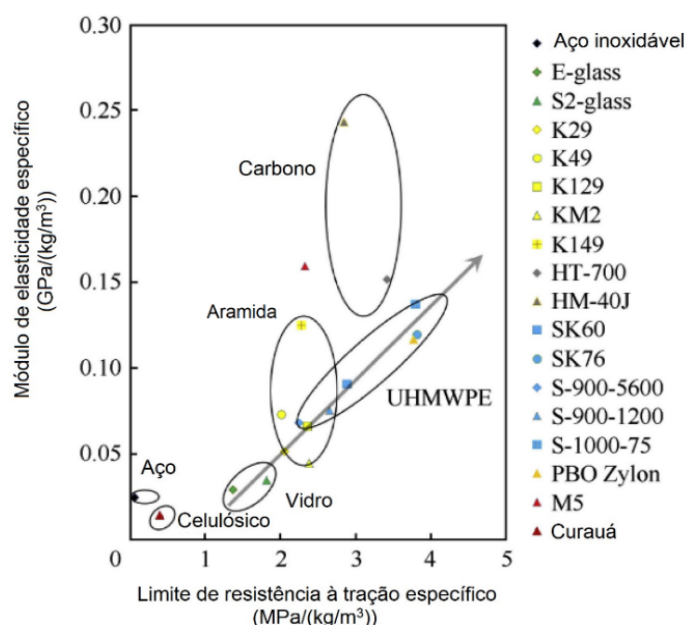
As fibras balísticas de alto desempenho têm propriedades específicas que as diferenciam de outras fibras artificiais utilizadas para aplicações industriais. A resistência à tração e o módulo de elasticidade são

maiores e o alongamento é menor do que as fibras tradicionais [47].

Cada fibra balística de alto desempenho tem propriedades relacionadas ao polímero e ao processo de fiação utilizado na sua fabricação. A resistência à tração dessas fibras é determinada pelas características estruturais, orientação molecular, área de seção transversal e grau de linearidade da cadeia polimérica. Como em qualquer produto de alta tecnologia agregada, tais aperfeiçoamentos resultam no aumento dos custos de produção do item, devendo o fabricante sempre realizar esse equilíbrio para tornar o item competitivo no mercado [48]. A **Figura 16** apresenta a correlação en-

tre as principais propriedades mecânicas de algumas fibras em comparação com o aço.

Fig. 16 - Gráfico correlacionando o módulo de elasticidade específico com o limite de resistência à tração específico das principais fibras do mercado.



Fonte: [48].

As fibras balísticas possuem aplicabilidade em três possíveis componentes dos coletes balísticos: painéis balísticos em forma de tecidos, placas balísticas monolíticas em forma de polímeros e como componentes de um Sistema de Blindagem Multicamadas (SBM). Para essas aplicações, podem ser utilizadas tanto fibras orgânicas como inorgânicas.

A Empresa DuPont® desenvolveu as fibras de aramidas, cuja composição química é de poliparafenileno tereftalamida (PPTA). Essas fibras foram estruturadas e transformadas em fios e em seguida tecidas, dando origem ao tecido flexível denominado Kevlar® [49]. Atualmente, existem diversas outras empresas que fabricam tecidos à base de aramida, uma delas é a Empresa Teijin Group®, que fabrica o tecido de aramida registrado como Twaron®.

Apesar de a aramida não apresentar a maior resistência a tração nem o maior módulo de elasti-

cidade entre as fibras de alto desempenho, elas se caracterizam por apresentar uma favorável relação entre suas propriedades, tais como baixa densidade, elevadas propriedades em tração, alta resistência química, alta temperatura de decomposição (acima de 500°C), baixa inflamabilidade e boas estabilidade térmica e dimensional [50].

As aramidas, em geral, não se fundem, pois, a decomposição ocorre na mesma temperatura de fusão cristalina (T_m). A grande desvantagem das aramidas é a fraca resistência à absorção de umidade. Dessa forma, quando utilizadas, devem estar acondicionadas de forma a terem o mínimo contato possível com o ar [51].

O UHMWPE foi desenvolvido recentemente, tendo como principais características a baixa densidade e alta tenacidade. Ele é responsável pela redução significativa do peso dos coletes balísticos, que podem ser utilizados tanto nos painéis balísticos como nas placas balísticas monolíticas ou SBM. No mercado, as suas marcas mais conhecidas são a Dyneema®, da empresa DSM, e o Spectra®, da empresa Honeywell [51].

O UHMWPE é a fibra menos densa e de maior resistência à abrasão de todas as fibras de alto desempenho. É também mais resistente à radiação ultravioleta e a produtos químicos do que as fibras de aramida. Estudos indicam que a fibra de UHMWPE, após uma prolongada exposição à radiação UV, apresenta uma perda de tenacidade e diminuição do alongamento (devido à cisão das cadeias poliméricas), e paralelamente ocorre um aumento do módulo de elasticidade (devido à reticulação das cadeias) [52].

O polibenzobisoxazol (PBO) teve o seu desenvolvimento iniciado junto ao UHMWPE. Fibras de PBO são extremamente fortes, duras e rígidas, e com resistência à tração e módulo maior do que as fibras de poliamidas ou de alguns polietilenos de ultra-alto peso molecular. Estas também apresentam excelente resistência química a vários solventes orgânicos, ácidos e bases, porém são facilmente degradadas quando expostas à radiação UV e à combinação de alta temperatura com umidade [53].

A fibra de PBO é comercialmente conhecida como Zylon®. Ela é fabricada pela empresa japonesa Toyobo [54]. Os tecidos Zylon® absorvem quase duas vezes a energia por unidade de densidade de área do Kevlar® e do Spectra®, e quase 12 vezes mais que o alumínio. O desempenho de impacto balístico dos sistemas PBO é substancialmente superior aos sistemas Kevlar® 29 e marginalmente melhor do que os sistemas Kevlar® KM2 [54, 55].

No entanto, a comercialização de coletes contendo a fibra Zylon® sofreu um grave impacto após um evento em 2003 em Forest Hills, no estado da Pensilvânia, nos EUA, no qual um policial que utilizava um colete balístico teve o seu equipamento perfurado por um disparo de pistola de calibre .40, que, de acordo com o nível de proteção do material, não deveria perfurar, o que acabou causando-lhe sérios ferimentos [56].

Em consequência disso, a NIJ realizou uma extensa apuração de todos os coletes balísticos que utilizavam a fibra de Zylon® em sua composição e, em 2005, chegou à conclusão de que cerca de 50% desses coletes não forneciam a proteção adequada para os seus usuários, concluindo que as fibras Zylon® apresentavam uma perda sistemática de resistência à tração, deformação à tração e desempenho balístico correlacionado com a quebra de ligações específicas na estrutura química do material [56-57].

A empresa responsável pela fabricação do material, assim como as empresas fabricantes dos coletes, foi punida com multas significativas, além de ter sido proibida pela NIJ a comercialização de coletes com essa composição [34, 48].

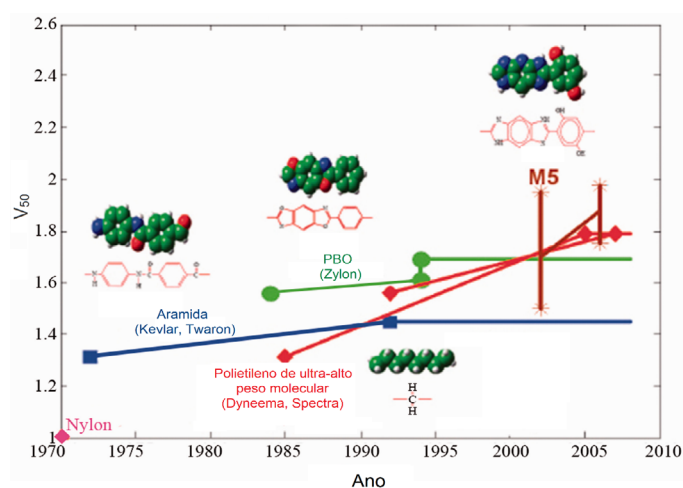
A fibra M5®, que é uma fibra de alto desempenho baseada em polipiridobisimidazol ou PIPD, foi desenvolvida pela empresa *Magellan Systems International* (USA), que se tornou uma parte da DuPont® em 2005. Essa fibra demonstra capacidade de absorção de energia específica muito alta em velocidades sônicas, e, portanto, tem um grande potencial para aplicação de balística, como observado na **Figura 17**, na comparação do seu desempenho com as demais fibras balísticas [2, 58]. Embora a literatura

apresente futuro promissor da fibra M5®, não existem no mercado itens que contenham essa fibra na sua composição.

A fibra P 120 é uma fibra de carbono de altíssimo módulo de elasticidade e possui a velocidade de onda de deformação mais alta comparada com as outras fibras. No entanto, não é um material tão indicado para aplicações balísticas, devido à baixa capacidade de absorção de energia [48].

A **Figura 17** mostra a evolução das fibras balísticas ao longo dos anos, considerando o desempenho balístico de V50 de cada uma delas.

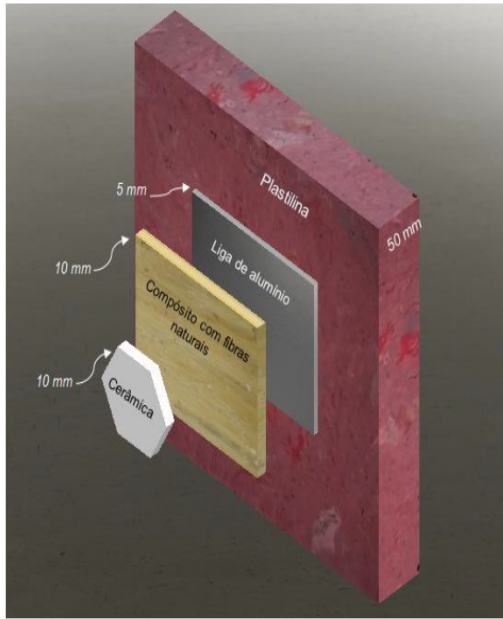
Fig. 17 - Evolução das fibras balísticas conforme o desempenho de V50.



Fonte: [48].

Nos últimos anos, a busca por produtos ecologicamente sustentáveis fez com que a pesquisa em fibras naturais com aplicações balísticas ganhasse grande notoriedade nas pesquisas de novos materiais balísticos. Diversos estudos têm sido publicados sobre a aplicação de fibras naturais, principalmente inseridas como segunda camada nos SBM, em que comumente a fibra natural compõe 30% de volume da camada de matriz de epóxi ou poliéster [59-61]. A **Figura 18** apresenta a composição do SBM com fibras naturais.

Fig. 18 - Composição do SBM com fibras naturais.



Fonte: [59].

Entre as fibras naturais em estudo, pode-se elencar algumas delas, como: Bambu, Malva, Cânhamo, Juta, Sisal, Rami e Curauá. Foram encontradas evidências de captura massiva de fragmentos maiores do que com fibras de Kevlar em alguns casos, principalmente nos compostos de Curauá. A nucleação e a propagação de trincas na matriz epóxi foram sugeridas para fornecer um mecanismo adicional de dissipação de energia em favor dos compósitos epóxi. Além de serem sustentáveis, essas fibras apresentam vantagens adicionais de fornecer sistemas de blindagem mais leves e com melhor custo-benefício quando comparados aos constituídos de aramida, o que torna essas fibras capazes de competir com a aramida nos SBM [48, 59].

Na **Tabela 5**, é possível visualizar as principais propriedades mecânicas de algumas fibras naturais comparadas à fibra de aramida.

Tab. 5 - Propriedades mecânicas de algumas fibras naturais em comparação com a fibra de aramida

| Fibra | Massa Específica (ρ) (g/cm ³) | Limite de Resistência à Tração (σ) (MPa) | Módulo de Elasticidade (E) (GPa) | Máx. (σ/ρ) (MPa.cm ³ /g) |
|---------|---|---|--|--|
| Bambu | 1,03 – 2,21 | 106 - 204 | - | 198 |
| Malva | 1,37 – 1,41 | 160 | 17,4 | 117 |
| Juta | 1,30 – 1,45 | 393 - 800 | 13 - 27 | 615 |
| Cânhamo | 1,07 | 389 - 690 | 35 | 649 |
| Sisal | 1,26 – 1,50 | 287 - 913 | 9 - 28 | 725 |
| Rami | 1,5 | 400 - 1620 | 61 - 128 | 1.080 |
| Curauá | 0,57 – 0,92 | 117 - 3000 | 27 - 80 | 2.193 |
| Aramida | 1,44 | 3000 - 4100 | 63 - 131 | 2.847 |

Fonte: [62-63].

5. Materiais cerâmicos para aplicação balística

Os materiais cerâmicos são materiais inorgânicos não metálicos, que têm por característica serem muito duros e frágeis. Eles são constituídos por meio de ligações predominantemente covalentes ou iônicas entre elementos metálicos e não metálicos. O seu emprego

como produto final é normalmente obtido por meio de processos de tratamento térmico em altas temperaturas, denominados sinterização [64].

Esses materiais possuem elevados módulos de elasticidade e baixas densidades, em comparação aos metais, sendo capazes de suportar temperaturas extremamente elevadas, muitas vezes acima do ponto de fusão da maioria dos metais utilizados em compo-

nentes. A principal desvantagem dos materiais cerâmicos é a sua fragilidade. Mesmo as menores falhas de superfície (arranhões ou cortes) ou falhas internas (inclusões, poros e microfissuras) podem ter resultados desastrosos [65].

Os materiais cerâmicos podem ser fabricados a partir de matérias-primas naturais ou sintéticas. As matérias naturais mais utilizadas industrialmente são: argila, caulim, quartzo, feldspato, filito, talco, grafita e zirconita. As sintéticas incluem, entre outras, Al_2O_3 , SiC , Si_3N_4 , ZrO_2 e B_4C [66-67]. Na **Tabela 6**, são apresentadas as principais propriedades mecânicas de materiais cerâmicos utilizados em blindagens balísticas.

A ação das cerâmicas em blindagem conjugada é efetiva, porque o impacto do projétil com a face cerâmica cria ondas de choque compressivas associadas às elevadas pressões, que atravessam o projétil e o cerâmico nas respectivas velocidades de onda. A interação das ondas, após reflexão, ocorre no interior do projétil e ocasiona a sua fragmentação. Além disso, quando a ponta do projétil atinge o alvo, uma região reduzida é submetida a alta compressão, com o surgimento de um cone de fraturas [68-69].

A erosão do projétil, ao atravessar o material cerâmico, causada pela ação das partículas fragmentadas, é responsável em grande parte pela sua perda de energia. Assim, é fundamental que a face cerâmica tenha uma dureza elevada [68-69].

A porosidade do material cerâmico em excesso reduz o desempenho da blindagem, devido à queda da dureza e da densificação. No entanto, uma porosidade residual pode favorecer a proteção balística, pois os poros constituem pontos de aquecimento localizados [70], em que parte da energia cinética do projétil é convertida em energia térmica. Sendo assim, a relação entre absorção de energia e dureza é importante para determinar a quebra da ponta do projétil.

Os principais materiais cerâmicos monolíticos usados em sistemas de blindagem para proteção balística pessoal e coletiva são: cerâmicas óxidas, especialmente a alumina (Al_2O_3); cerâmicas não óxidas à base de nitrogênio (nitretos); à base de carbono (carbeto), como carbeto de boro (B_4C) e carbeto de silício (SiC);

ou boreto e suas combinações, como diboreto de titânio (TiB_2) [71-72].

As blindagens de alumina são os materiais cerâmicos que possuem o uso mais difundido para esse fim. Elas possuem desempenho balístico adequado e baixo custo de fabricação. As cerâmicas à base de alumina também são amplamente utilizadas como blindagem transparente na forma de safira ou oxinitrato policristalino de alumínio (ALON), que são úteis para janelas de veículos e de visualização de instrumentos. Essa versatilidade e a eficácia econômica têm como custo a alta massa específica, quando comparada com outras blindagens cerâmicas [73].

A pesquisa e o desenvolvimento de blindagens de B_4C demonstraram que esse material tem muita utilidade para a indústria de defesa, apresentando maior dureza e menor massa específica do que a alumina [74].

As blindagens de B_4C apresentam alta eficiência para velocidades de impacto relativamente baixas, no entanto, para projéteis perfurantes com alta energia cinética, quando a pressão gerada pela interação atinge a ordem de 20 GPa, o material acaba passando por um processo de amorfização que ocasiona uma queda no desempenho balístico [75]. A principal desvantagem das blindagens de B_4C é o seu elevado custo de fabricação [76].

Em contrapartida, as blindagens de SiC apresentam menor custo de produção do que as de B_4C , com propriedades mecânicas ligeiramente inferiores [76]. Blindagens produzidas com esse material são indicadas, também, como substitutas para as situações em que a amorfização do B_4C possa ocorrer [75].

Kaufmann et al. [77] avaliaram o desempenho de blindagens de SiC , B_4C e Al_2O_3 submetidas a impactos de munição .50 perfurante pela profundidade de penetração. Das conclusões do trabalho, o SiC apresentou a melhor performance e a Al_2O_3 a pior. O SiC , em muitos casos, apresentou comportamento similar ao do B_4C .

A principal desvantagem das blindagens cerâmicas reside no fato de que, ao serem impactadas, acabam favorecendo a produção de microtrincas, que podem se estender até a região de impacto [78], provocando fragmentação do material e induzindo uma vulnerabilidade no material em resistir a novos impactos.

A resposta balística de um material cerâmico está associada a uma série de fatores, como microestrutura, composição química, constituição de fases, propriedades físicas (densidade, dureza, módulo de Young, resistência mecânica, resistência à fratura e velocidade sônica), além da eficiência em dissipar a energia do impacto balístico. Uma propriedade isoladamente não define o comportamento do material, principalmente porque o mecanismo de fratura durante o impacto do projétil é muito complexo, e as fraturas são criadas por gradientes de tensão que ocorrem em um período relativamente pequeno. Somente a combinação de diferentes propriedades leva o material a proporcionar desempenho satisfatório. Para uma melhor análise da escolha da blindagem, a associação entre essas diferentes condições deve ser considerada, aliada ainda ao correto processo de fabricação, que é fundamental para a otimização das propriedades do material cerâmico acabado [8-9].

Para exemplificar, a dureza é vital para fraturar e erodir projéteis, a tenacidade à fratura e a resistência à flexão ajudam a cerâmica a resistir a impactos múltiplos, o módulo de elasticidade está relacionado à propagação da onda de tensão, e o modo de fratura está relacionado à quantidade de energia absorvida pela cerâmica. Assim, melhorias em várias propriedades são necessárias para que sua combinação resulte em uma cerâmica balística mais eficiente [67].

O processo de fabricação é muito importante na determinação das propriedades finais do produto. No entanto, geralmente, os processos que proporcionam as melhores propriedades são os mais onerosos, como é o caso do processo *hot pressing* (HP) para as cerâmicas de SiC, nas quais as propriedades atingem muitas vezes valores próximos aos limites previstos teoricamente para os materiais, mas são extremamente caros e limitados quanto à geometria de peças [8-9].

Tab. 6 - Propriedades das principais cerâmicas avançadas

| | Massa Específica (g/cm ³) | Limite de Resistência à Flexão (MPa) | Resistência à Compressão (MPa) | Módulo de Elasticidade (GPa) | Tenacidade à Fratura (MPa.m ^{1/2}) |
|--|--|--|--------------------------------------|------------------------------------|--|
| Al ₂ O ₃ | 3,98 | 379 | 3.025 | 379 | 5,5 |
| SiC | 3,1 | 260 - 612 | 3.860 | 414 | 4,4 |
| Si ₃ N ₄ (reação química) | 2,5 | 350 | 1.030 | 207 | 3,3 |
| Si ₃ N ₄ (prensado a quente) | 3,2 | 650 | 3.450 | 310 | 5,5 |
| ZrO ₂ (tenacificada) | 5,8 | 674 | 1.725 | 200 | 12,1 |
| B ₄ C | 2,5 | 235 - 321 | 2.200 | 410 - 425 | 4 |

Fonte: [76, 80].

6. Sistema de Blindagem Multicamadas

As blindagens multicamadas ou mistas, denominadas anteriormente como SBM, consistem na sobreposição de camadas de materiais distintos com o objetivo de explorar a diferença das suas proprie-

dades de forma a garantir o melhor desempenho. A combinação desses materiais com propriedades distintas e complementares visa evitar a penetração do projétil e reduzir o trauma causado pelo impacto. A **Figura 19** apresenta uma ilustração de um SBM sob impacto balístico.

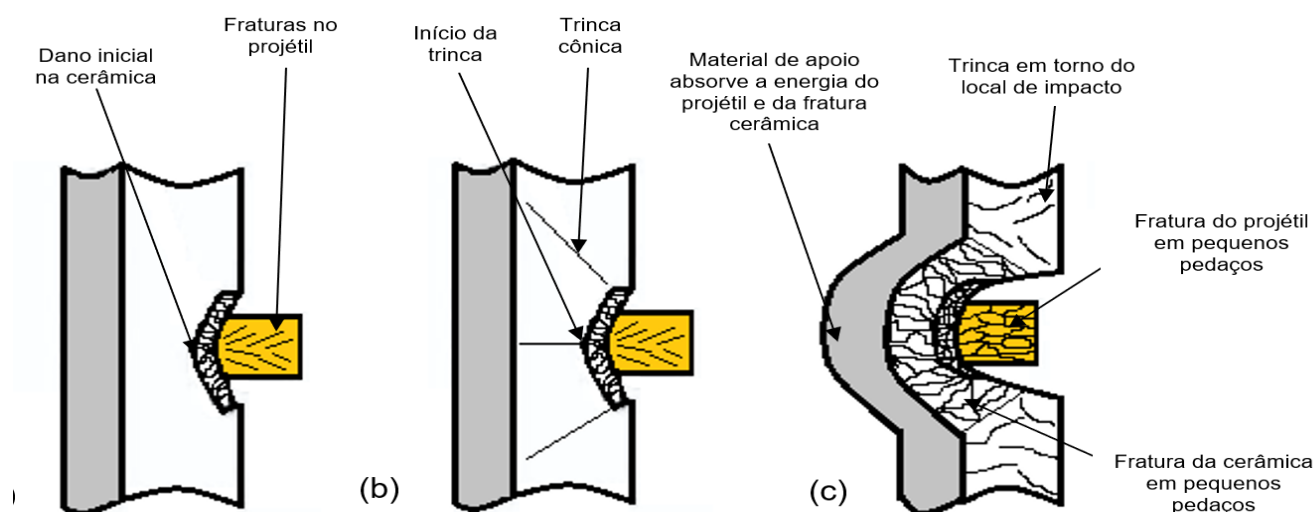
No SBM, os materiais cerâmicos são utilizados para resistir aos esforços provenientes dos eventos iniciais, servindo como uma primeira camada, em que ocorre o impacto inicial do projétil. A sua função é desgastar a ponta e dissipar parte da energia cinética através da fragmentação da sua massa, o que acaba melhorando a distribuição da pressão do impacto sobre a segunda camada, conforme apresentado na seção 6.

A segunda camada da blindagem, nesse sistema multicamadas, é formada por materiais dúcteis (metálicos ou poliméricos) e têm como função absorver

a energia cinética residual do projétil, dos estilhaços oriundos da munição e da própria cerâmica através de sua deformação plástica. Os materiais mais aplicados para essa finalidade são a aramida, o polietileno de ultra-alto peso molecular ou compostos de fibras naturais em matriz polimérica, conforme apresentado na seção 5.

Dependendo do sistema, pode ser aplicada uma terceira camada constituída por um metal dúctil, geralmente uma liga de alumínio, a fim de absorver a energia residual por meio da sua deformação plástica [76].

Fig. 19 - Diferentes estágios associados ao impacto entre projétil e material cerâmico de blindagem: (a) estágio da quebra; (b) estágio da erosão; (c) estágio da captura.



Fonte: [79].

7. Conclusão

Embora algumas soluções balísticas para os calibres levantados pelos ROC sejam atendidas no mercado externo, atualmente a Base Industrial de Defesa (BID) nacional não possui materiais homologados que atendam à demanda levantada pelo Ministério da Defesa. A Seção de Engenharia de Materiais do IME possui inúmeras pesquisas na área de blindagem individual, entre outras aplicações, com materiais metálicos, materiais compósitos de fibras naturais, materiais poliméricos e, finalmente, com materiais cerâmicos.

A BID enfrenta grandes dificuldades no desenvolvimento de soluções balísticas para atender ao solicitado pelo MD. O principal obstáculo é que a maior parte das matérias-primas em uso no mercado são importadas, o que torna a pesquisa no âmbito do IME de enorme relevância, pois o Programa de Ciência dos Materiais busca soluções em materiais abundantes no território nacional, como no caso das fibras naturais e nos materiais cerâmicos à base de SiC, visto que o Brasil é o quinto maior produtor mundial desse tipo de composto e de Al_2O_3 , que tem a vantagem de poder ser processado em menores temperaturas que o SiC, sem o controle de atmosfera.

Assim, as pesquisas desenvolvidas no IME têm por objetivo atender ao critério determinado pelo MD e fomentar a BID, ou ainda as próprias unidades fabris do Exército, como já foi realizado em anos anteriores por meio da fabricação de coletes balísticos pelo Parque Regional de Manutenção da 5ª Região Militar, que foram distribuídos para as “tropas” e ainda se en-

contram em uso em diversas organizações militares do Exército brasileiro.

Agradecimentos

Agradecimentos às empresas RIMA, FIVEN e DuPont, pelo fornecimento de matérias-primas.

Referências

- [1] HENDERSON, J. Ballistic Body Armor Protecting The Protectors. Strategic Standardization, v. 12, n. 4, p. 1-18, 2008.
- [2] MAWKHLIENG, U.; MAJUMDAR, A.; LAHA, A. A review of fibrous materials for soft body armour applications. RSC Advances, v. 10, n. 2, p. 1066-1086, 2020.
- [3] PRAT, N. et al. Contemporary body armor: technical data, injuries, and limits. European Journal of Trauma and Emergency Surgery, v. 38, n. 2, p. 95-105, 2012.
- [4] BALOS, S. et al. Perforated Plate for Ballistic Protection – A Review. Metals, v. 11, n. 4, p. 526, 2021.
- [5] CHENG, Y. H. et al. Mechanical characteristics and ballistic behaviors of high strength and hardness armor steels. Journal of Constructional Steel Research, v. 197, p. 107502, 2022.
- [6] NAIK, S.; DANDAGWHAL, R. D.; LOHARKAR, P. K. A review on various aspects of Kevlar composites used in ballistic applications. Materials Today: Proceedings, v. 21, p. 1366-1374, 2020.
- [7] DENOUE, C. et al. Visualization of the damage evolution in impacted silicon carbide ceramics. International Journal of Impact Engineering, v. 21, n. 4, p. 225-235, 1998.
- [8] MEDVEDOVSKI, E. Ballistic performance of armour ceramics: Influence of design and structure. Part 1. Ceramics International, v. 36, n. 7, p. 2103-2115, 2010.
- [9] MEDVEDOVSKI, E. Ballistic performance of armour ceramics: Influence of design and structure. Part 2. Ceramics International, v. 36, n. 7, p. 2117-2127, 2010.
- [10] FIGUEIREDO, A. B. H. S. et al. Response to ballistic impact of alumina-UHMWPE composites. Materials Research, v. 21, n. 5, 2018.
- [11] BUFFON, S. J.; BORGES, P. C.; AZEVETO, E. C.; LIMA, E. S. Influência do Número de Camadas de Tecido no Desempenho Balístico de Alvos de Kevlar® XP S104. C&T. Revista Militar de Ciência e Tecnologia, v. 36, p. 51-62, 2019.
- [12] CROUCH, I. G. Body armour - New materials, new systems. Defence Technology, v. 15, n. 3, p. 241-253, 2019.
- [13] BRASIL. Portaria Normativa nº 14/MD, de 23 de março de 2018. Brasília, DF: Ministério da Defesa, 2018.
- [14] GOMES FILHO, P. R. S. O projeto Sistema Combatente Brasileiro-COBRA. Doutrina Militar Terrestre em Revista, v. 7, n. 19, p. 6-9, 2019.
- [15] LESKE, A. Uma revisão sobre a inovação em defesa: do spin-off ao spin-in. Brazilian Journal of Political Economy, v. 38, n. 2, p. 377-391, 2018.
- [16] GUADAHUMI, C. História antiga 16 – Hegemonia de Roma. Babilonialabella.blogspot, [s. l.], 1 mar. 2017. Disponível em: <http://babilonialabella.blogspot.com/2017/03/historia-antigua-16-hegemonia-de-roma-5.html>. Acesso em: 5 dez. 2022.
- [17] ROMERO, F. A brief history of body armor. Time, New York, 2009. Disponível em: <https://content.time.com/time/business/article/0,8599,1889795,00.html>. Acesso em: 29 maio 2024.
- [18] LAMMLE, R. A Brief History of Bulletproof Vests. Mental Floss, [s. l.], 2010. Disponível em: <https://www.mentalfloss.com/article/24039/brief-history-bulletproof-vests>. Acesso em: 29 maio 2024.
- [19] ROWEL, D. M. A History of Bulletproof vest and Body Armor. Thought Co., [s. l.], 2011. Disponível em: <https://www.thoughtco.com/history-of-body-armor-and-bullet-proof-vests-1991337>. Acesso em 29 maio 2024.
- [20] HAZELL, P. J. Advances in Applied Ceramics: Structural, Functional and Bioceramics. Guest Editorial, v. 109, n. 8, p. 445, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1179/174367610X12804792635864>
- [21] MORRIS, R. Relembrando os aviadores da 2ª Guerra Mundial. untoldvalor.blogspot.com, [s. l.], 26 abr. 2008. Disponível em: <http://untoldvalor.blogspot.com/2008/04/flight-clothing-for-high-altitudes.html>. Acesso em: 5 dez. 2022.

- [22] DAVID, N. V.; GAO, X.-L.; ZHENG, J. Q. Ballistic resistant body armor: contemporary and prospective materials and related protection mechanisms. *Applied Mechanics Reviews*, v. 62, n. 5, 2009.
- [23] KABIR, R. B.; FERDOUS, N. Kevlar-the super tough fiber. *International Journal of Textile Science*, v. 1, n. 6, p. 78-83, 2012.
- [24] WANG, M. et al. Research on Bending and Ballistic Performance of Three-Dimensional Ply-to-Ply Angle Interlock Kevlar/EP Armor Material. *Materials*, v. 15, n. 19, p. 6994, 2022.
- [25] Les gilets pare-eclats des membres d'équipage aviation aircrew body armor. US Army Collectors. Disponível em <https://usarmy-collectors.pagesperso-orange.fr/fichiers%20listes%20et%20divers/body%20armor%203.htm>. Acesso em: 5 dez. 2022.
- [26] FOUST, C.; JENSON, C. Industry analysis for body armor procurement. 2006.
- [27] HOWARD, C. E. This Vest May Save Your Life!. *Azimuth*, p. 21.
- [28] PASGT (Sistema de Armadura Pessoal para Tropas Terrestres). IWM Museum. Disponível em: <https://www.iwm.org.uk/collections/item/object/30013077>. Acesso em: 5 dez. 2022.
- [29] MITCHELL, K. B.; CHOI, H. J.; GARLIE, T. N. Anthropometry And Range Of Motion Of The Encumbered Soldier. Army Natick Soldier Research Development And Engineering Center Ma Natick United States, 2017.
- [30] SecPro Advanced EOD Suit. Security Pro USA. Disponível em: <https://www.securityprousa.com/products/sec-pro-advanced-eod-suit>. Acesso em: 5 dez. 2022.
- [31] LOPEZ, C.T. New Soldier armor weighs less, offers more options. US Army, Washington, D.C., 20 mar. 2017. Disponível em: https://www.army.mil/article/184156/new_soldier_armor_weighs_less_offers_more_options. Acesso em: 5 dez. 2022.
- [32] SPC - Soldier Plate Carrier. *Armor Express*. [S. l.]: [20--]. Disponível em: <https://www.armorexpress.com/kdh-defense-systems/>. Acesso em: 5 dez. 2022.
- [33] PARKER III, C. An Approach for the Enhancement of Military Combat, Performance and Personal Protective Equipment for Ground Troops. 2010. Dissertação (Mestrado) – Faculty of Auburn University, Auburn, 2010.
- [34] NATIONAL INSTITUTE OF JUSTICE. NIJ 0101.04: Ballistic resistance of body armor. Washington, D.C.: National Institute of Justice; 2000.
- [35] KELLY, K. et al. Evaluation of the Low Intensity Threat Environment (LITE) Armor Plate and Third Generation Plate Carrier System for the United States Marine Corps. San Diego: Naval Health Research Center San Diego, 2019.
- [36] PLACA BALÍSTICA STAND ALONE. Cop, [s. l.], [20--]. Disponível em: <https://www.cop-shop.de/en/product/ballistic-plate-level-vpam9-stand-alone-250-x-300-mm-2610-g-5888>. Acesso em: 5 dez. 2022.
- [37] BRASIL. Instruções Gerais para a Gestão do Ciclo de Vida dos Sistemas e Materiais de Emprego Militar (EB10-IG-01.018). Brasília, DF: Comando do Exército, 2016.
- [38] NATIONAL INSTITUTE OF JUSTICE. NIJ 0101.06: Ballistic resistance of body armor. Washington, D.C.: National Institute of Justice, 2008.
- [39] NATIONAL INSTITUTE OF JUSTICE. NIJ 0123.00: Ballistic resistance of body armor. Washington, D.C.: National Institute of Justice, 2023.
- [40] BRASIL. Portaria nº 211-EME, de 23 de outubro de 2013. Brasília, DF: Estado Maior do Exército, 2013.
- [41] BRASIL. Regulamento de Produtos Controlados, aprovado pelo Decreto nº 10.030, de 30 de setembro de 2019.
- [42] BRASIL. Portaria nº 18 – D LOG, de 19 de dezembro de 2006.
- [43] GREENE, M. Body armor: Protecting our nation's officers from ballistic threats. *NIJ Journal*, v. 280, p. 24-28, 2018.
- [44] V50 Ballistic test for armor. MIL- STD-662F, 1997.
- [45] DUPONT. O que é o V50 e como ele pode salvar a sua vida? Dupont, [s. l.], [20--]. Disponível em: https://www.dupont.com.br/content/dam/dupont/amer/us/en/safety/public/documents/en/Newsletter_car_armor.pdf. Acesso em: 5 dez. 2022.
- [46] *MS Instruments*. Disponível em: <https://msinstruments.co.uk/ballistic-instrumentation/>. Acesso em: 5 dez. 2022.
- [47] BHATNAGAR, A. 4.19 Lightweight Fiber-Reinforced Composites for Ballistic Applications. In: *Comprehensive Composite Materials II*. Amsterdam: Elsevier, 2018. p. 527-544.
- [48] BENZAIT, Z.; TRABZON, L. A review of recent research on materials used in polymer-matrix composites for body armor application. *Journal of Composite Materials*, v. 52, n. 23, p. 3241-3263, 2018.
- [49] THOMAS, E. L. Opportunities in protection materials science and technology for future Army applications. *Advances in Ceramic Armor VIII*, p. 145-148, 2012.

- [50] YADAV, R. et al. Body armour materials: from steel to contemporary biomimetic systems. *RSC Advances*, v. 6, n. 116, p. 115145-115174, 2016.
- [51] DEWANGAN, M. K.; PANIGRAHI, S. K. Factors influencing the ballistic impact mechanisms of textile composite materials: a review. *Polymers for Advanced Technologies*, 2021.
- [52] ZHANG, H.; SHI, M.; ZHANG, J.; WANG, S. Effects of Sunshine UV Irradiation on the Tensile Properties and Structure of Ultrahigh Molecular Weight Polyethylene Fiber. *Journal of Applied Polymer Science*, v. 89, p. 2757-2763, 2003.
- [53] VIVAS, V.; SUAREZ, J. C. M.; WERBER, R. P. Influência da degradação ambiental no comportamento mecânico e balístico de compósitos produzidos com fibra de polietileno de ultra alto peso molecular. 2013, 216f. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2013.
- [54] CUROSU, I. et al. Tensile behavior of high-strength strain-hardening cement-based composites (HS-SHCC) made with high-performance polyethylene, aramid and PBO fibers. *Cement and Concrete Research*, v. 98, p. 71-81, 2017.
- [55] TABIEI, A.; NILAKANTAN, G. Ballistic impact of dry woven fabric composites: a review. *Applied Mechanics Reviews*, v. 61, n. 1, 2008.
- [56] WILHELM, M.; BIR, C. Injuries to law enforcement officers: the backface signature injury. *Forensic Science International*, v. 174, n. 1, p. 6-11, 2008.
- [57] NATIONAL INSTITUTE OF JUSTICE (NIJ) et al. Status Report to the Attorney General on Body Armor Safety Initiative Testing and Activities, 2004.
- [58] LAMMERS, M. et al. Mechanical properties and structural transitions in the new rigid-rod polymer fibre PIPD (M5') during the manufacturing process. *Polymer*, v. 39, n. 24, p. 5999-6005, 1998.
- [59] MONTEIRO, S. N. et al. Natural fibers reinforced polymer composites applied in ballistic multilayered armor for personal protection – an overview. *Green Materials Engineering*, p. 33-47, 2019.
- [60] COSTA, U. O. et al. Effect of graphene oxide coating on natural fiber composite for multilayered ballistic armor. *Polymers*, v. 11, n. 8, p. 1356, 2019.
- [61] NURAZZI, N. M. et al. A review on natural fiber reinforced polymer composite for bullet proof and ballistic applications. *Polymers*, v. 13, n. 4, p. 646, 2021.
- [62] DE LIMA, T. E. S. et al. Potential of Using Amazon Natural Fibers to Reinforce Cementitious Composites: A Review. *Polymers*, v. 14, n. 3, p. 647, 2022.
- [63] BRAGA, F. O.; LIMA JR., E. P.; LIMA, E. S.; MONTEIRO, S. The Effect of Thickness on Aramid Fabric Laminates Subjected to 7.62 mm Ammunition Ballistic Impact. *Materials Research-Ibero-american. Journal of Materials*, v. 1, p. 1, 2017.
- [64] WACHTMAN, J. B. Jr. *Structural ceramics*, Academic Press Inc., San Diego, 1989.
- [65] CHAWLA, K. K. *Composite materials: Science and engineering*. London: Springer, 1987.
- [66] SALEIRO, G. T. et al. Mechanical behavior of SiC additivated with Al_2O_3 and Y_2O_3 produced by synthesis by auto combustion sustained at high temperature. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, v. 15, n. 2, p. 96, 2018.
- [67] DRESCH, A. B. et al. Ballistic Ceramics and Analysis of their Mechanical Properties for Armour Applications: A Review. *Ceramics International*, v. 47, n. 7, Part A, p. 8743-8761, 2021.
- [68] REED, J. S. *Principles of ceramics processing*. London: John Wiley & Sons, 1995.
- [69] GOMES, A. V. Comportamento balístico da alumina com adição de nióbia e variação da geometria do alvo. 2004. Tese (Doutorado em Ciência dos Materiais) - IME, 2004.
- [70] MEYERS, M. A. *Dynamic behavior of materials*. London: John Wiley & Sons, 1994.
- [71] POPA, I.-D.; DOBRIȚA, F. Considerations on Dop (Depth Of Penetration) Test for Evaluation of Ceramics Materials Used in Ballistic Protection. *ACTA Universitatis Cibiniensis*, v. 69, n. 1, p. 162-166, 2017.
- [72] RAHBEK, D. B. et al. Effect of composite covering on ballistic fracture damage development in ceramic plates. *International Journal of Impact Engineering*, v. 99, p. 58-68, 2017.
- [73] HEALEY, Adam. Understanding the ballistic event: methodology and observations relevant to ceramic armour. 2017. Tese (Doutorado) – University of Surrey, Surrey, 2017.
- [74] CONSENTINO, P.A. S. L. Efeito de carbeto metálicos na sinterização do carbo de boro por prensagem a quente. 2006. 150f. 2006. Tese de Doutorado. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- [75] RAHBEK, D. B.; JOHNSEN, B. B. *Dynamic behaviour of ceramic armour systems*. Kjeller: Norwegian Defence Research Establishment, 2015.

- [76] DA SILVA, M.V.; STAINER, D.; AL-QURESHI, H.A.; HOTZA, D. Blindagens Cerâmicas para Aplicações Balísticas: Uma Revisão. *Cerâmica*, v. 60, p. 323-331. 2014.
- [77] KAUFMANN, C. et al. Influence of material properties on the ballistic performance of ceramics for personal body armour. *Shock and Vibration*, v. 10, n. 1, p. 51-58, 2003.
- [78] PICKERING, E. G. et al. Effect of confinement on the static and dynamic indentation response of model ceramic and cermet materials. *International Journal of Impact Engineering*, v. 110, p. 123-137, 2017.
- [79] FISHER, J.T., Validation of a simple go/no-go damage detection system for personal ceramic body armor using pressure sensitive film. *Graduate Theses and Dissertations*. Iowa State University, Iowa, 2011.
- [80] KARANDIKAR, P. G. et al. A review of ceramics for armor applications. *Advances in Ceramic Armor IV*, v. 29, p. 163-175, 2009.

Avaliação de propriedades mecânicas de chapas laminadas das ligas de alumínio AA 5052 e AA 5050C

Isabella Cristina da Silva Jorge^{1*}, Natália Barros Barony¹, Ângelo Siqueira da Silva¹, Talita Gama de Sousa¹, Saulo Brinco Diniz², Andersan dos Santos Paula¹

¹Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

²Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Angra dos Reis, RJ, Brasil

*isabellajorge@ime.cb.br

Resumo: Este estudo foi conduzido em chapas das ligas AA 5052, produzida por processo de fundição direta (DC), e AA 5050C, produzida por processo de fundição contínua de chapas (TRC), com o intuito de caracterizar microestrutural e mecanicamente as referidas ligas, assim como avaliar a ocorrência de envelhecimento dinâmico em função da taxa de deformação aplicada em ensaios de tração uniaxial. De maneira geral, observou-se valores superiores de resistência e menor ductilidade para a liga AA 5052, e ao analisar o aspecto das curvas de tração, pôde-se verificar a presença de serrilhados em ambas as ligas, indicativos de variações rápidas e sucessivas de tensões, na região de deformação plástica, sugerindo a ocorrência do envelhecimento dinâmico, e como, em menor velocidade de deformação, esse efeito é mais pronunciado. A frequência e magnitude de quedas de tensão verificadas podem ser associadas principalmente aos diferentes teores de Mg das ligas, sendo menor para a liga AA 5050C que possui menor teor de Mg.

PALAVRAS-CHAVE: Ligas de alumínio 5xxx, processo de fundição contínua, processo de fundição direta, propriedades mecânicas, envelhecimento dinâmico.

Abstract: This study was conducted on AA 5052 sheets that had been produced by direct casting and AA 5050C sheets that had been produced by twin roll casting to microstructurally and mechanically characterize these alloys and evaluate their dynamic aging occurrence as a function of the strain rate applied in uniaxial tensile tests. In general, AA 5052 alloy showed higher strength values and lower ductility. Analysis of the aspect of tensile curves showed serrations in both alloys, indicating rapid and successive stresses variations in the plastic deformation region for both alloys, suggesting dynamic aging occurrence and how this effect is more pronounced at lower displacement speed. The frequency and magnitude of the decrease stress can be associated with the distinct Mg content of the alloys, being smaller in the AA 5050C.

KEYWORDS: 5xxx aluminum alloys, Direct chill process, Twin roll caster process, mechanical properties, aging dynamic.

1. Introdução

As ligas de alumínio por sua atraente combinação entre resistência/peso, boa conformabilidade, elevada resistência à corrosão, entre outras características, tem se destacado como uma alternativa viável para aplicações na indústria automobilística na produção de componentes ou partes estruturais, e ganhando destaque, principalmente para aplicações em carrocerias de ônibus, devido à possibilidade de redução no peso dos automóveis, resultando na diminuição de gastos com combustíveis e emissão de gases [1].

Contudo, tais aplicações ainda são restritas devido à tecnologia de produção complexa e ao alto custo do alumínio quando comparado à produção de aços. O método mais comumente utilizado para a fabricação de ligas de alumínio na forma de chapas é baseado no processo de fundição direta (*Direct Chill – DC*).

O processo de fundição direta (*DC*) consiste no vazamento de placas, seguido de processo de usinagem e laminação a quente, com o intuito de reduzir significativamente a espessura da placa em um processo de conformação plástica a quente. Na sequência, a chapa segue para laminação a frio, o que lhe confere ganho nas propriedades mecânicas em termos de resistên-

cia, aliado ao decréscimo da ductilidade, e, em alguns casos, segue posteriormente para tratamento térmico de recozimento para fins de alívio de tensões/estabilização ou recristalização parcial/total em função da aplicação final [2,3].

Outra forma de obtenção de laminados de alumínio e suas ligas, é através do processo de Fundição Contínua de Chapas (*Twin roll caster – TRC*), no qual a fabricação de chapas laminadas a quente e bobinadas ocorre diretamente do metal líquido. O processo consiste na combinação das etapas de solidificação e laminação a quente do material, o que permite que a chapa, na forma de bobina, siga diretamente para o processo de laminação a frio [4,5].

O processamento de chapas de alumínio através da fundição contínua (*TRC*), ocasiona redução de custos no processo de fabricação, bem como redução do tempo de processamento. Tais características, aliadas a facilidade de alteração da espessura e da largura de vazamento sem a necessidade de alterar as dimensões do molde, tornam a produção mais ágil e vantajosa [5].

Ligas de alumínio de distintas séries normalmente são produzidas a partir do processo DC e posteriormente são laminadas (a quente e a frio) e recozidas, porém também é observado a produção de algumas delas em escala laboratorial e industrial pelo processo TRC com algumas ressalvas. A literatura destaca que ligas com intervalo de solidificação estreito são largamente produzidas em diversas dimensões pelo processo TRC. Contudo, para ligas com amplo intervalo de solidificação, o processo ainda é limitado, não permitindo a obtenção de um produto final com as propriedades mecânicas adequadas [6]. Outro fator limitante é a composição química das ligas, algumas podem apresentar grandes problemas relacionados à formação de linhas centrais de segregação e à formação de camada de óxido excessiva, a citar como exemplo as ligas da série 5xxx. Fator esse que se fez presente na Companhia Brasileira de Alumínio (CBA), em Alumínio/São Paulo (SP), ao tentar produzir a liga AA 5052 na sua composição original por TRC, sendo possível contornar o problema apenas com o ajuste

composicional que resultou na liga AA 5050C [7], ambas objeto deste estudo.

Outro aspecto dos produtos laminados das ligas da série 5xxx é que são susceptíveis de apresentar envelhecimento dinâmico em função da taxa de deformação a que são submetidas mesmo a temperatura ambiente, o que se revela por serrilhados na curva tensão-deformadas [8,9]. A justificativa para este comportamento, padrão serrilhado, é atribuída ao movimento brusco das discordâncias que resulta na interação dinâmica das discordâncias com os átomos de soluto substitucional presentes na solução sólida [9]. Nessa percepção, supõe-se que o movimento das discordâncias é impedido por átomos de soluto que as isolam, consequentemente, para as discordâncias serem liberadas, torna-se necessário um aumento da tensão, resultando numa sensibilidade negativa de tensão/deformação, conduzindo a instabilidade de fluxo, ou seja, o efeito Portevin-Le Chatelier (PLC).

Dessa forma, o objetivo do presente estudo foi realizar uma caracterização microestrutural e mecânica de chapas das ligas de alumínio AA 5052 e AA 5050C laminadas e recozidas, produzidas pela CBA a partir de processos DC e TRC respectivamente, como avaliar a ocorrência de envelhecimento nas ligas de quando solicitadas mecanicamente via ensaio de tração uniaxial em duas velocidades distintas em temperatura ambiente.

2. Materiais e Métodos

Os materiais em estudo, fornecidos pela empresa Companhia Brasileira de Alumínio (CBA) – situada em Alumínio – SP, consistem em duas ligas de alumínio da série 5xxx, AA 5052 e AA 5050C – conforme composição química apresentada na Tabela 1 – que foram produzidas por distintos processos, sendo a primeira via fundição direta (*DC*) e a segunda por fundição contínua de chapas (*TRC*). Essas ligas posteriormente foram submetidas a uma mesma rota e parâmetros de processamento até a obtenção de chapas finas com aproximadamente 1,20 mm de espessura na condição final laminada a frio e recozida/estabilizada, conforme Figura 1, que apenas se

distinguirão pelo valor da redução total na primeira etapa de laminação a frio (68,3% para a liga 5052 e 72,8% para a liga 5050C) e temperatura de encharque no recozimento intermediário (360 °C liga 5052 e 380 °C liga 5050C).

A caracterização microestrutural foi conduzida com auxílio de um microscópio eletrônico de varredura com canhão de emissão de campo, FEI Quanta FEG, observando as amostras na espessura da chapa, no plano que contém a direção de laminação (DL), após preparação metalográfica: lixamento de 220 a 4000 mesh, polimento em pasta de diamante de 3 e 1 µm e um polimento final eletrolítico com solução de

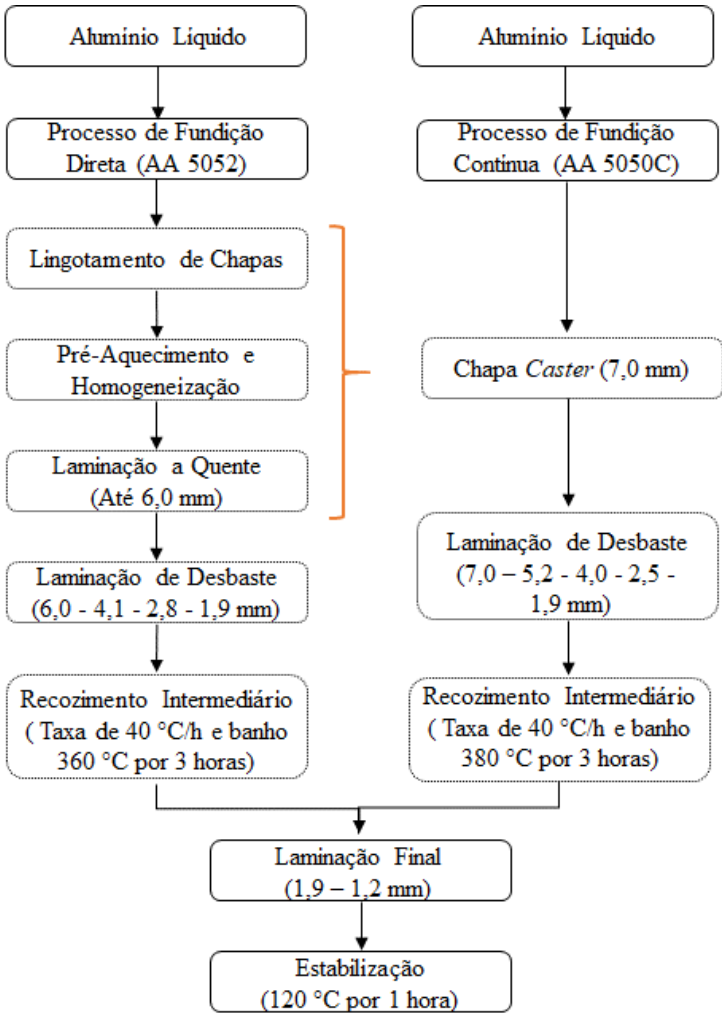
ácido perclórico (20% HClO₄ + 80% C₂H₅OH) por 5 segundos a 10 Volts, em temperatura ambiente.

Tabela 1 - Composição química das ligas em estudo, com destaque aos elementos de ligas e residuais, % em peso.

| Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Ti | Cr |
|----------|------|------|------|------|------|------|
| AA 5052 | | | | | | |
| 0,06 | 0,26 | 0,06 | 0,06 | 2,41 | 0,20 | 0,01 |
| AA 5050C | | | | | | |
| 0,07 | 0,47 | 0,36 | 0,10 | 1,39 | 0,00 | 0,04 |

Fonte: CBA.

Figura 1 - Etapas de processamento na CBA das ligas da série 5xxx em estudo.



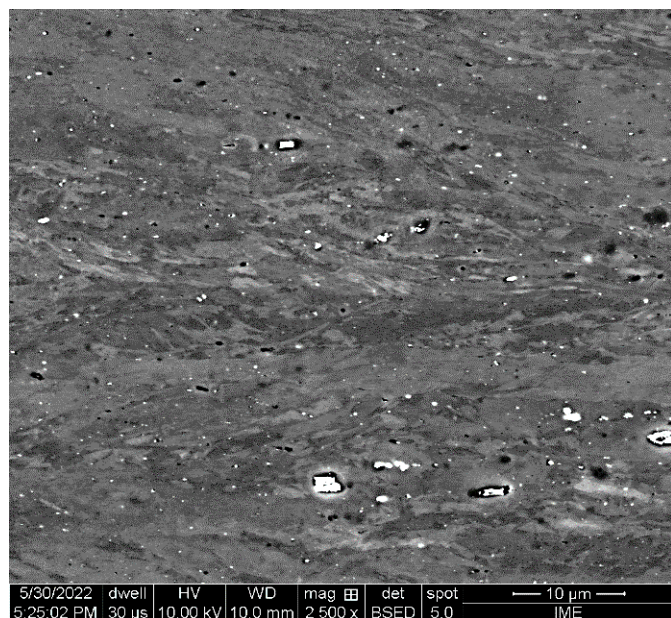
Fonte: CBA.

Para caracterização mecânica foram realizados ensaios de dureza Vickers e de tração uniaxial. O ensaio de dureza foi conduzido com 10 medidas para cada amostra ao longo do plano da chapa, com carga de 10 kgf. Enquanto o ensaio de tração uniaxial foi conduzido em corpos de prova confeccionados conforme a norma ASTM E8/E8M [10] sob duas condições de velocidade de deslocamento do travessão (2 e 7 mm/min), utilizando tecnologias diferentes de extensômetro (de contato para velocidade de 2 mm/min e óptico para velocidade de 7 mm/min), a fim de averiguar a ocorrência do envelhecimento dinâmico em função da velocidade de deformação.

3. Resultados e Discussão

Nas Figuras 2 e 3 são apresentados os resultados provenientes da análise microestrutural via Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) com utilização do detector de elétrons retroespalhados (BSE) das ligas AA 5052 e AA 5050C, respectivamente.

Figura 2 - Micrografia da liga AA 5052 (DL, com setas indicando cavidades (em preto) que continham partes das possíveis partículas de inclusão/precipitados ainda presentes (em branco).

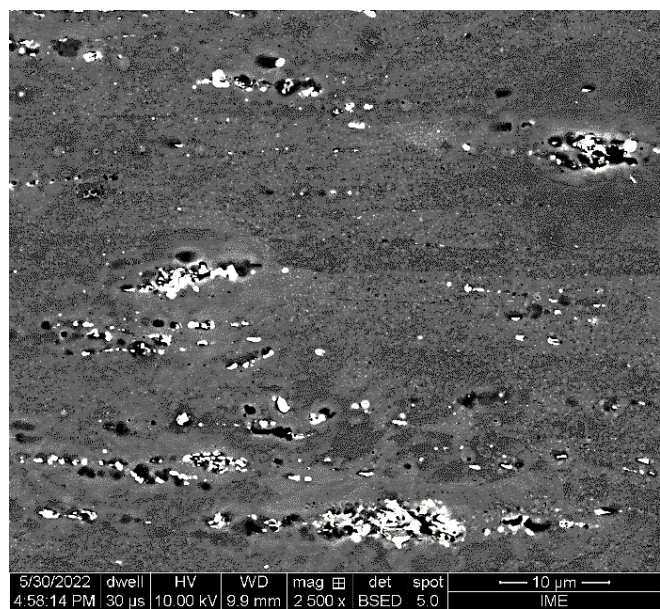


Fonte: Elaborado pelos autores.

Observa-se a distribuição homogênea e similar de inclusões e/ou precipitados ao longo das amostras alinhadas na DL, e que a liga produzida pelo processo de fundição contínua de chapas (AA 5050C) apresenta partículas de inclusões/segunda fase aparentemente, em maior quantidade distribuídas ao longo da matriz em relação à liga produzida pelo processo de fundição direta (AA 5052). Tal fato pode ser explicado por dois possíveis motivos. A primeira possibilidade pode estar associada às maiores taxas de solidificação obtidas no processo de fundição contínua de chapas, que favorece a formação de uma maior quantidade de sítios para nucleação de segunda fase [11]. A segunda possibilidade, se a maior parte dessa partículas estiverem associadas a inclusões, refere-se ao fato do lingote produzido por fundição direta – DC, liga AA 5052, ser submetido ao processo de escarificação da sua superfície antes de ser laminado a quente, o que garante a remoção de grande parte da camada de alumina (Al_2O_3) formada na superfície do lingote, enquanto o produto da fundição contínua de chapas – TRC, liga AA 5050C, mantém em seu volume toda a alumina formada durante o processo de lingotamento conjugado a laminação quente. Observa-se ainda que o polimento eletrolítico promoveu a remoção de parte das inclusões e/ou precipitados devido ao comportamento anódico na célula eletrolítica formada, dando lugar as cavidades apresentadas junto a matriz metálica nestas microestruturas, conforme destacado nas Figuras 2 e 3.

Na Tabela 2 são apresentados os resultados do ensaio de dureza Vickers realizado. Os valores médios de dureza apresentados nas ligas apresentaram diferença significativa, sendo possível observar uma redução de 21,78% no valor de dureza, para a liga AA 5050C em comparação com a AA 5052. Ressaltou-se, com ajuda do cálculo da variância e da confiabilidade dos resultados obtidos no ensaio, não haver dispersão significativa entre os valores obtidos para cada liga em estudo.

Figura 3 - Micrografia da liga AA 5050C (DL→), com setas indicando cavidades (em preto) que contêm partes das possíveis partículas de inclusão/precipitados ainda presentes (em branco).



Fonte: Elaborado pelos autores.

Tabela 2 - Resultados do ensaio de dureza Vickers.

| | AA 5052 | AA 5050C |
|--------------------------------|---------|----------|
| Média | 87,38 | 68,35 |
| Desvio Padrão | 2,42 | 1,38 |
| Variância | 5,86 | 1,91 |
| Mínimo | 83,59 | 65,64 |
| Máximo | 91,17 | 69,92 |
| Número de Medidas | 10 | 10 |
| Índice de confiabilidade (95%) | 1,50 | 1,18 |

Fonte: Elaborado pelos autores.

Esperava-se que a liga AA 5050C, por possuir maior quantidade de inclusões e/ou partículas segunda fase dispersas na matriz devido o processo de produção via processamento contínuo, seria mais dura que AA 5052. Tal fato não é observado e pode ser explicado através da diferença composicional das ligas (Tabela 1). A liga AA 5050C é uma adequação composicional da liga AA 5052 com o intuito de reduzir a camada

de óxido formada durante o processamento TRC. O magnésio foi um dos elementos alterados, tendo a sua quantidade reduzida, e por se tratar de um elemento que se encontra em solução sólida preferencialmente, essa redução de teor afeta diretamente a dureza e resistência mecânica da liga. Indícios estes que destacam que provavelmente estas partículas observadas em análises no MEV estão associadas em grande parte a inclusões de alumina (Al_2O_3), as quais não tem papel no endurecimento da liga, como ocorre com as partículas de segunda fase intermetálicas formadas neste tipo de ligas. Outro ponto que suporta o comportamento de menor dureza para a liga 5050C são as condições nas quais foi submetida ao processamento termomecânico, ou seja, a maior redução total aplicada na primeira etapa de laminação a frio e maior temperatura de encharque que foi exposta no recozimento intermediário (Figura 1). Fatores estes que podem ter propiciado uma redução na temperatura de recristalização (pela redução imposta na laminação de desbaste) somada a possibilidade de crescimento de grão (pela temperatura de encharque imposta no recozimento para recristalização) na condição que foi posteriormente submetida a laminação a frio final e recozimento para estabilização, contribuindo assim também para o decréscimo da dureza.

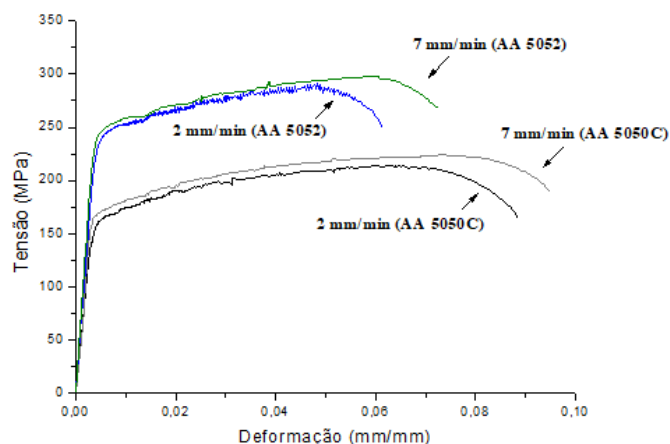
Na Figura 4 têm-se as curvas tensão-deformação de engenharia das ligas AA 5052 e AA 5050C, com velocidades de deformação no ensaio de tração uniaxial de 2 mm/min e 7 mm/min.

Em relação ao aspecto da curva, observa-se serrilhados causados pelo efeito Portevin-Le Chatelier, ou comportamento de envelhecimento dinâmico, na região de deformação plástica de ambas as ligas ensaiadas com a velocidade 2 mm/min. A liga AA 5052 exibe não só uma magnitude maior de quedas de tensão (diferença entre o pico e o vale de tensão em cada denticção), como também uma maior frequência (número de quedas de tensão) quando comparada a liga AA 5050C.

Segundo o modelo dinâmico de envelhecimento de tensão, quando a movimentação das discordâncias é temporariamente interrompida em obstáculos, tais como florestas de discordâncias, os átomos de soluto que já estão isolados nesses obstáculos, migram em

direção a essas discordâncias fixas. Eles então formam atmosferas em torno das discordâncias e fazem com que elas sejam bloqueadas. Quando a força aplicada é elevada o suficiente, as discordâncias móveis se desprendem das atmosferas e avançam livremente em direção a outros obstáculos. A repetição deste processo constitui a produção serrilhada observada na curva de tensão-deformação [12].

Figura 4 - Curvas tensão-deformação de engenharia das ligas AA 5052 e AA 5050C com velocidades de deformação no ensaio de tração uniaxial de 2 mm/min e 7 mm/min



Fonte: Elaborado pelos autores.

Assim, é possível inferir que, como a liga AA 5052 possui maior concentração de magnésio (Tabela 1), a maior parte dos átomos de soluto de Mg movimentam-se no sentido das discordâncias e, portanto, o deslocamento das discordâncias é mais difícil. Logo, uma força maior é necessária para a movimentação da discordância, resultando em uma maior queda de tensão na curva tensão-deformação. Por outro lado, quando a concentração de magnésio é alta, a interação de átomos de soluto de magnésio com as discordâncias é mais frequente e, consequentemente, o processo de quedas por tensão torna-se mais frequente. Observa-se que o serrilhado ocorre a uma frequência mais elevada para a liga AA 5052 do que para a liga AA 5050C.

Para as curvas ensaiadas com velocidade de deformação de 7 mm/min, constata-se, como esperado, uma

diminuição na quantidade e na intensidade do serrilhado. Tal fato ocorre pelo aumento da taxa de deformação, pois não há tempo para a movimentação da atmosfera de soluto, que é responsável pelo envelhecimento dinâmico. Dessa forma, essa velocidade de ensaio não é suficiente para eliminar o serrilhado, contudo, as quedas de tensão tornam-se menos frequentes.

Na Tabela 2 são apresentadas as propriedades mecânicas das ligas AA 5052 e AA 5050C obtidas através dos ensaios de tração uniaxial realizados com velocidade de deformação de 2 mm/min e de 7 mm/min.

Tabela 2 - Propriedades mecânicas das ligas AA 5052 e AA 5050C extraídas dos ensaios de tração.

| Propriedades | Velocidade de Deformação (mm/min) | | | |
|--|--------------------------------------|----------------|---------------|---------------|
| | AA 5052 | | AA 5050C | |
| | (2) | (7) | (2) | (7) |
| Limite de Escoamento (σ _e) (MPa) | 240,74 ± 8,06 | 254,26 ± 6,13 | 156,61 ± 6,96 | 169,88 ± 0,41 |
| Módulo de Elasticidade (E) (GPa) | 66,78 ± 5,83 | 71,84 ± 6,36 | 68,58 ± 11,68 | 73,52 ± 13,38 |
| Limite de Resistência à Tração (LRT) (MPa) | 286,76 ± 9,39 | 298,91 ± 20,47 | 211,13 ± 2,39 | 209,46 ± 0,48 |
| Alongamento uniforme (%) | 4,24* | 5,44* | 5,91* | 5,69* |
| Alongamento de ruptura (%) | 4,82* | 6,05* | 6,60* | 6,32* |

***Dados extraídos das curvas tensão-deformação da Figura 4.**

Fonte: Elaborado pelos autores.

Quanto às propriedades mecânicas observadas no ensaio de tração, é possível verificar que a liga AA 5052 apresentou valores maiores de resistência à tração e limite de escoamento e menores de alongamento quando comparada à liga AA 5050C, como também se observou no ensaio de dureza. De acordo com a literatura, materiais processados por fundição contínua de chapas (TRC), apresentam propriedades mecânicas superiores

em termos de resistência quando comparados aos produzidos por fundição direta (DC). Tal fato decorre da presença de maior número de segunda fase precipitada durante o TRC, onde, possivelmente, os precipitados são ancorados, preferencialmente, nos contornos de grão, atuando como refinadores dos grãos [13]. Analisando a equação de Hall-Petch, observa-se que a relação entre o tamanho de grão e tensão são inversamente proporcionais; isto é, quanto menor o tamanho de grão, maior será a resistência à tração do material. Infere-se, por meio das propriedades mecânicas obtidas, que as ligas em estudo apresentaram comportamento contrário ao apresentado na literatura.

Esse comportamento pode ser explicado pela diferença de composição entre as ligas, uma vez que a liga AA 5050C apresenta menor teor de magnésio e cromo e maior teor de cobre, somado ao fato de ter sido submetida a maior redução na espessura e maior temperatura de encharque nos processamentos subsequentes a laminação a quente, ou seja, de laminação a frio de desbaste e recozimento intermediário para recristalização, que foram adotados para a liga AA 5052, antes de ser submetida a condições semelhantes a liga 5052 na laminação final e recozimento para estabilização (Figura 1). Essa variação composicional foi necessária a fim de reduzir a oxidação superficial durante a solidificação no processamento TRC. Com isso, apesar de ter a propensão de apresentar grãos mais refinados pelo processo TRC, em relação à liga AA 5052, a liga AA 5050C apresenta menores limites de resistência à tração e escoamento, e maior ductilidade, provavelmente justificado pelo menor endurecimento por solução sólida e/ou por precipitação, devido a composição, somado ao maior tamanho de grão, devido ao processamento intermediário (conforme Figura 1).

Acerca da utilização de diferentes velocidades de ensaio na tração uniaxial, comparando os resultados obtidos, observou-se que estes apresentaram diferenças para os valores de limite de escoamento, módulo de elasticidade, limite de resistência e alongamento. Esse efeito em relação aos valores do limite de escoamento, limite de resistência e alongamento, pode ser explicado devido ao aumento da quantidade de discordâncias empilhadas em função do aumento da taxa de deformação,

que provocam maior resistência ao início da deformação, maior encruamento e extensão na capacidade de deformação plástica, no regime de deformação uniforme e localizada na estrição [14]. No entanto, em relação ao módulo de elasticidade a diferença pode ser atribuída ao fato do ensaio ter sido conduzido com tecnologias diferentes de extensômetro (de contato para velocidade de 2 mm/min e óptico para velocidade de 7 mm/min).

4. Considerações Finais

As resistências mecânicas apresentadas pelas propriedades da liga AA 5052, tais como limite de escoamento e resistência à tração, foram superiores às apresentadas pela liga AA 5050C, tanto nos ensaios em tração uniaxial quanto em dureza Vickers, ao contrário da ductilidade inferior. Esse resultado pode ser explicado pelas variações existentes nas composições químicas de cada liga e variações nos processos de produção. É possível que pequenos decréscimos nas temperaturas e/ou no tempo de encharque nos tratamentos de recozimento intermediário e para estabilização propiciem ajustes que resultariam em valores próximos de propriedades de ambas as ligas submetidas a reduções distintas na laminação a frio de desbaste e similares na laminação a frio final, sem novos ajustes na composição química da liga 5050C.

Assim, a liga AA 5050C pode ser considerada como uma opção viável de substituição da liga AA 5052 para aplicações que não demandem elevada resistência mecânica e exibam maior ductilidade nas condições de processamento adotadas para o presente estudo.

Quanto à ocorrência de envelhecimento dinâmico, a presença de serrilhados na região de deformação plástica em ambas as ligas, indica a existência do fenômeno. A frequência e magnitude de quedas de tensão verificadas podem ser associadas aos diferentes teores de Mg das ligas, em função da sua presença em solução sólida. Observa-se ainda que o aumento da velocidade de deformação de 2 mm/min para 7 mm/min durante o ensaio de tração, promove uma diminuição na quantidade e intensidade do serrilhado, como também, maior extensão no alongamento uniforme e total, provavelmente devido a redução do tempo para a movimentação

da atmosfera de soluto durante o deslizamento das discordâncias. Ou seja, o processamento de conformação dessas ligas para obtenção de peças, pode ser facilmente realizado sem a ocorrência de envelhecimento dinâmico quando realizado sob taxas de deformação superiores.

Agradecimentos

Os autores agradecem a CBA pela doação das ligas para este estudo, ao Instituto Militar de Engenharia

(IME) pela infraestrutura laboratorial para condução das caracterizações e, particularmente, ao Centro de Pesquisa da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) por realizar os ensaios de tração com extensômetro óptico. Somado ao CNPq e a CAPES/PROEX pelas bolsas de mestrado e doutorado, como também pelos recursos para confecção dos corpos de prova de tração subsidiados pela CAPES/PROEX do Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais (PPGCM) do IME.

Referências Bibliográficas

- [1] ABAL – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. Vantagens e desvantagens do alumínio. *Abal*, São Paulo, [20--?]. Disponível em: <https://abal.org.br/aluminio/vantagens-do-aluminio/>. Acesso em: 27, jul. 2018.
- [2] OTOMAR, H. P.; PLAUT, R. L. Comparison of the microstructure and texture evolution in AA 1050 aluminum alloy sheets produced by the DC and CC methods. In: SUAREZ, C. E. *et al.* (org.). *Light Metals 2012*. New York: Springer, 2012. p. 223-238.
- [3] DU, Q.; ESKIN, D. G.; KATGERMAN, L.; NADELLA, R. Macrosegregation in direct-chill casting of aluminium alloys. *Progress in Materials Science*, [s. l.], v. 53, n. 3, p. 421-480, 2008.
- [4] BAREKAR, N. S.; BHAGURKAR, A. G.; DAS, S.; FAN, Z. FAKIR O. E.; HUANG, Y.; YANG, X.; ZHOU, L.; The impact of melt conditioning on microstructure, texture and ductility of twin roll cast aluminium alloy strips. *Materials Science & Engineering A*, [s. l.], v. 650, p. 365-373, 2016.
- [5] KARLÍK, M.; ROUBAUT, F.; SLÁMA, P.; SLÁMOVÁ, M.; VÉRONA, M. Differences in microstructure and texture of Al–Mg sheets produced by twin-roll continuous casting and by direct-chill casting. *Materials Characterization*, [s. l.], v. 49, n. 3, p. 231-240, 2003.
- [6] OGATA, C. T. **Correlações entre microestrutura, parâmetros térmicos e propriedades mecânicas de ligas de alumínio da série 5xxx solidificadas unidirecionalmente**. 2017. 106 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia dos Materiais) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2017.
- [7] BARONY, N. B. **Avaliação estrutural e mecânica de chapas das ligas de alumínio AA 5052 E AA 5050C**. 2019, 126 p. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais), Instituto Militar de Engenharia, 2019.
- [8] CHEN, X.; FANG, Y.; MAO, J.; PAN, F.; WANG, B. Effects of cold rolling and heat treatment on microstructure and mechanical properties of AA 5052 aluminum alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, [s. l.], v. 25, n. 8, p. 2481-2489, 2015.
- [9] ABOULFADL, H.; CHOI, P.; DEGES, J.; RAABE, D. Dynamic strain aging studied at the atomic scale. *Acta Materialia*, [s. l.], v. 86, p. 34-42, 2015.
- [10] ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E8/E8M – 13a**: Standard Test Method for Tension Testing of Metallic Materials. West Conshohocken: ASTM, 2013. 28 p.
- [11] HOSEINIFAR, A.; SALARI, S.; SOLTAN, M. A. N. Effect of twin-roll casting parameters on microstructure and mechanical properties of AA5083-H321 sheet. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, [s. l.], v. 26, n. 10, p. 2552-2560, 2016.
- [12] MORRIS, J. G.; WEN, W.; ZHAO, Y. The effect of Mg precipitation on the mechanical properties of 5xxx aluminum alloys. *Materials Science and Engineering A*, [s. l.], v. 392, n. 1-2, p.136-144, 2005.
- [13] MARTINS, J. P.; PADILHA, A. F. Caracterização da liga comercial de alumínio 3003 produzida por fundição contínua de chapas (twin roll caster) – microestrutura. *Revista Escola de Minas*, Ouro Preto, v. 59, n. 4, p. 427-431, 2006.
- [14] DONIČ, T.; KOČIŠKO, R.; KOVÁČOVÁ, A.; KVAČKAJ, M.; KVAČKAJ, T.; POKORNÝ, I. Influence of strain rate on ultimate tensile stress of coarse-grained and ultrafine-grained copper. *Materials Letters*, [s. l.], v. 64, n. 21, p. 2344-2346, 2010.

Resistência balística e propriedades de absorção de micro-ondas de um composto feito de tecido de aramida impregnado com polietilenoglicol e nanopartículas de hematita

Danúbia Bordim de Carvalho^{1*}

¹ Instituto Militar de Engenharia —Praça General Tibúrcio, 80, Praia Vermelha, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, CEP 29.270-030

* dan.bordim@gmail.com

RESUMO: A resistência balística e a absorção de micro-ondas de um composto de tecido de aramida impregnado com polietilenoglicol e nanopartículas de hematita foram investigadas para diferentes concentrações de hematita entre 0 e 17% em peso. Foram identificados diferentes mecanismos de absorção de dano e de energia durante o impacto balístico: formação de cone na face posterior do alvo, falha de tração dos fios primários e deformação dos fios secundários. Em termos de absorção de energia, os melhores resultados foram obtidos com hematita a 7% em peso, enquanto a menor profundidade de penetração (DOP) foi observada em um composto com hematita a 9% em peso. Uma imagem de microscópio eletrônico de varredura (MEV) do compósito com 7% de hematita após o teste balístico mostrou que o principal mecanismo de absorção de energia foi a deformação dos fios secundários. A absorção de micro-ondas foi medida usando a técnica de guia de ondas na faixa de frequência de 8 a 12 GHz. Os resultados mostraram que a perda dielétrica ϵ''/ϵ' é máxima para uma concentração de 3% de hematita, enquanto a perda magnética μ''/μ' é máxima para uma concentração de 11% em peso de hematita. Um compromisso razoável entre a resistência balística e a absorção de micro-ondas parece ser um composto com 7% em peso de hematita.

PALAVRAS-CHAVE: Absorção de radar; blindagem balística; impacto balístico; fluido de espessamento por cisalhamento.

ABSTRACT: The ballistic resistance and microwave absorption of a composite of aramid fabric impregnated with polyethylene glycol and hematite nanoparticles was investigated for different hematite concentrations between 0 and 17 wt%. Different damage and energy absorbing mechanisms during ballistic impact were identified: cone formation on the back face of the target, tensile failure of primary yarns and deformation of secondary yarns. In terms of energy absorption, the best results were achieved with 7 wt% hematite, while the smallest depth of penetration (DOP) was observed for a composite with 9 wt% hematite. A scanning electron microscope (SEM) image of the composite with 7% hematite after the ballistic test showed that the main energy absorption mechanism was deformation of secondary yarns. Microwave absorption was measured using the waveguide technique in the frequency range from 8 to 12 GHz. Results showed that the dielectric loss ϵ''/ϵ' is maximum for a concentration of 3% hematite, while the magnetic loss μ''/μ' is maximum for a concentration of 11 wt% hematite. A reasonable compromise between ballistic resistance and microwave absorption seems to be a composite with 7 wt% hematite.

KEYWORDS: Radar absorption; Ballistic shielding; Ballistic impact; Shear thickening fluid.

1. Introdução

Desde a antiguidade a humanidade tem buscado desenvolver artigos para proteção do corpo contra perigos e lesões. Peles de animais, fibras naturais e materiais metálicos como bronze, ferro e aço foram usados para esse fim ao longo da história. Durante o século XX, as fibras naturais deram lugar às sintéticas.

A armadura moderna é projetada para proteger contra projéteis, bem como contra perfurações e cortes causados por objetos pontiagudos. Elas geral-

mente consistem em uma combinação de metal, cerâmica e tecidos. Os tecidos são compostos por fibras poliméricas de alta resistência que fornecem proteção adicional sem comprometer a mobilidade de soldados, policiais e de equipes de segurança[1,2]. Reforços avançados foram desenvolvidos para melhorar a flexibilidade e reduzir o peso desses tecidos, usando menos camadas e mantendo a mesma eficiência. Esses reforços são desenvolvidos impregnando os tecidos com fluidos não newtonianos cuja viscosidade aparente varia com o aumento da tensão[3-11].

A escolha de nanopartículas magnéticas para a produção de um fluido não newtoniano pode adicionar a propriedade de material absorvente de radar (RAM) ao tecido. Esses materiais são atenuadores eficientes da radiação eletromagnética em comprimentos de onda usados por radares, reduzindo a seção transversal do radar de soldados, automóveis, navios de guerra e aeronaves militares. Teber et al.[12] usaram materiais magnéticos de Ni-Co em compósitos poliméricos como absorvedores de micro-ondas na banda X (8-12 GHz).

O objetivo deste trabalho foi estudar o reforço de armadura e o comportamento de absorção de radar[12-17] de um fluido não newtoniano à base de hematita. Para isso, foram produzidas misturas de nanopartículas de hematita com polietileno glicol 200 (PEG-200) com diferentes concentrações de hematita. Essas misturas foram usadas para impregnar o tecido de aramida; a resistência balística e as propriedades de absorção de micro-ondas do compósito foram avaliadas para diferentes concentrações de hematita. Além disso, foram investigados os mecanismos de absorção de danos e energia durante o impacto balístico.

2. Materiais e métodos

2.1 Materiais

Os materiais utilizados neste trabalho foram nitrato férrico (Sigma-Aldrich, 98%), glicina (Sigma-Aldrich, 98,5%), 200 g/mol de PEG (Honeywell Riedel-de Haën), etanol absoluto (Quimex, 93%), tecido aramida de 0,28 mm de espessura com densidade de 210 g/m² [HY Networks (Shanghai)] e MDF de 1 polegada de espessura (Arauco do Brasil).

2.2 Preparação da amostra

As nanopartículas de hematita foram sintetizadas pelo método de combustão com razão glicina/nitrato de 0,5[18,19]. Misturas de PEG-200 com hematita 0%, 3%, 5%, 7%, 9%, 11%, 13%, 15% e 17% foram sonificadas por 30 min, diluídas em 40 mL de etanol, sonificadas novamente por 30 minutos e utilizadas para im-

pregnar dois pedaços quadrados de tecido de aramida com área de 49 cm² em um vidro de relógio de 150 mm de diâmetro. Essas peças foram prensadas por 10 min a 3 ton/cm². A prensagem das amostras reduz a massa sem diminuir a resistência balística, pois apenas o fluido não impregnado é removido. Em seguida, as amostras foram secas em estufa a 79 °C por 24 h.

2.3 Métodos Experimentais

A hematita foi caracterizada por difração de raios X usando um difratômetro Expert Pro Panalitcal com radiação K α (1,5418 Å) e o software TOPAS baseado no método de Rietveld.

Para os testes balísticos, foi utilizado um rifle de ar comprimido Gunpower SSS com supressor de ruído Padrão Armas. O projétil era de chumbo de calibre 22 com uma massa estimada de 3,3 g. A velocidade inicial foi medida usando um cronógrafo balístico Air Chrony MK3 com precisão de 0,15 m/s e a velocidade residual foi medida usando um cronógrafo balístico ProChrono Pal com precisão de 0,31 m/s.

Após os testes balísticos, foram obtidas imagens de amostras com hematita a 7% em um FEI Quanta FEG 250 SEM.

A caracterização eletromagnética dos compósitos foi realizada por meio de medidas de refletividade/absorção utilizando a técnica de guia de onda na banda X do espectro eletromagnético (8 a 12 GHz). Este dispositivo foi acoplado a um analisador de rede KEYSIGHT PNA-L (modelo N5232A) com um gerador de frequência (300 kHz-20 GHz). O material de referência utilizado para avaliar a eficiência de absorção dos compósitos foi uma placa de alumínio, a qual reflete 100% da radiação incidente.

2.4 Massa relativa M_c

A massa relativa M_c foi calculada usando a Eq. 1 para expressar a quantidade relativa de impregnação de aramida pelo fluido[11]:

$$M_c = (Massa\ do\ compósito - Massa\ de\ aramida) / Massa\ de\ aramida. \quad (1)$$

2.5 Energia de absorção (E_{Abs})

Nos testes de absorção de energia, o rifle de ar comprimido foi posicionado a 5 m de distância do alvo, que consistia em uma amostra quadrada presa a uma estrutura circular de MDF fixada por um torno de bancada e alinhada perpendicularmente ao rifle. Um cronógrafo balístico foi colocado a 10 cm de distância da saída do supressor de ruído e outro cronógrafo balístico foi colocado 10 cm atrás do compósito para determinar a velocidade residual do projétil. A energia de absorção foi estimada usando a equação

$$E_{Abs} = M_p (v^2 - v_r^2)/2 \quad (2)$$

em que M_p é a massa do projétil, v é a velocidade de impacto e v_r é a velocidade residual[20]. Pasquali et al.[21] mostrou que a energia é absorvida por um alvo de tecido fino devido a seis mecanismos de absorção/dissipação: formação de cone na face traseira do alvo ; falha de tração de fios primários ; deformação de fios secundários ; obstrução por cisalhamento ; início e crescimento da delaminação; e rachaduras na matriz[22,23].

2.6 Profundidade de penetração (DOP)

Nos testes de DOP, o rifle de ar foi posicionado a 5 m de distância do alvo, que consistia em uma amostra quadrada presa com fita adesiva a uma placa de MDF e alinhada perpendicularmente ao rifle[24–29]. Um supressor de ruído foi usado para aumentar a estabilidade do projétil na saída do rifle de ar, reduzindo a turbulência causado pelo escapamento. As placas de MDF foram usadas como anteparas porque o MDF é um material homogêneo, plano e denso, sem o grão da madeira maciça. O cronógrafo balístico foi colocado a 10 cm de distância da saída do supressor de ruído. Quando a distância entre a arma de ar comprimido e o alvo é pequena, como neste caso, a velocidade de impacto pode ser substituída pela velocidade de saída[30].

2.7 Fator de mérito

Uma vez que, no ensaio balístico, as amostras são finas e homogêneas, a desaceleração do projétil a

pode ser assumida como constante. Aplicando a segunda lei de Newton

$$a = - F/M_p \quad (3)$$

quando F é a força no projétil, a equação de Torricelli pode ser escrita na forma

$$v^2 - v_r^2 = 2 (F/M_p) d \quad (4)$$

em que d é a distância percorrida pelo projétil. Substituindo a Eq. 2 na Eq. 4 e dividindo pela massa relativa M_c temos

$$E_{Abs}/(M_c d) = F / M_c \quad (5)$$

Um fator de mérito FM foi definido como a razão mostrada na Eq. 5 com $DOP = d$:

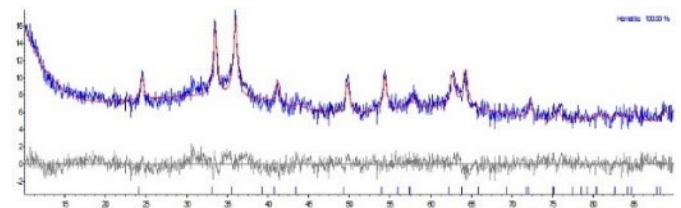
$$FM = E_{Abs} / M_c DOP \quad (6)$$

3. Resultados e discussão

3.1 Difração de raios X

A Figura 1 mostra o padrão de difração de raios X das nanopartículas. O difratograma mostrou 100% de hematita, com tamanho de cristalito de 20 nm e GOF (bondade do ajuste) de 1,29.

Figura 1 - Difratograma de raios X das nanopartículas.



3.2 Testes balísticos

Os testes balísticos consistiram em medir a energia absorvida pelo compósito e a profundidade de pene-

tração (*DOP*) de um projétil em um anteparo de MDF (placa de fibra de média densidade).

Todos os tiros penetraram completamente na amostra. Um tiro foi disparado em cada experimento e cinco experimentos foram realizados para cada composição.

A Tabela 1 mostra a massa relativa do compósito (M_c), a energia de absorção (E_{Abs}), a profundidade de

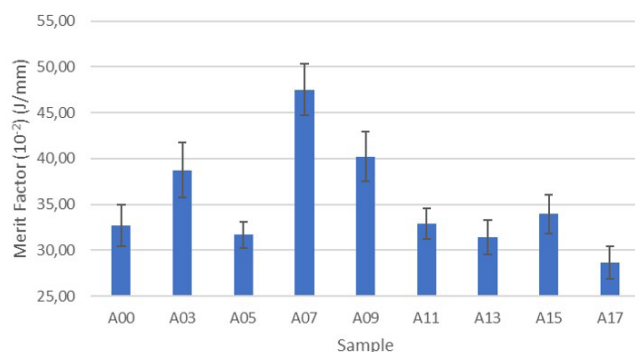
penetração (*DOP*) e o fator mérito (*FM*) para todas as composições. A energia absorvida é máxima para as amostras com 7% de hematita, enquanto a *DOP* é mínima para amostras com 9% de hematita. Isso é atribuído ao fato de que o uso do anteparo altera o comportamento mecânico do tecido de aramida, favorecendo a quebra das fibras primárias, o que se torna um importante mecanismo de absorção de energia.

Tabela 1 - Resultados médios dos ensaios balísticos.

| COMPÓSITO | M_c | E_{Abs} (J) | DOP (milímetro) | FM (10^{-2}) (J/mm) |
|-----------|-----------------|-----------------|------------------|-------------------------|
| A00 | 0.58 ± 0.07 | 5.70 ± 0.75 | 29.85 ± 0.35 | 32.72 ± 2.26 |
| A03 | 0.62 ± 0.07 | 6.66 ± 0.91 | 27.75 ± 0.39 | 38.71 ± 3.00 |
| A05 | 0.64 ± 0.06 | 6.69 ± 0.40 | 33.00 ± 0.43 | 31.68 ± 1.40 |
| A07 | 0.57 ± 0.07 | 7.74 ± 0.58 | 28.58 ± 0.55 | 47.51 ± 2.78 |
| A09 | 0.56 ± 0.06 | 6.01 ± 0.76 | 26.70 ± 0.40 | 40.20 ± 2.71 |
| A11 | 0.53 ± 0.07 | 5.21 ± 0.37 | 29.92 ± 0.27 | 32.85 ± 1.67 |
| A13 | 0.61 ± 0.06 | 6.51 ± 0.66 | 33.93 ± 0.55 | 31.45 ± 1.87 |
| A15 | 0.58 ± 0.06 | 5.51 ± 0.54 | 27.97 ± 0.57 | 33.96 ± 2.12 |
| A17 | 0.68 ± 0.09 | 6.14 ± 0.55 | 31.52 ± 0.50 | 28.65 ± 1.78 |

A Figura 2 mostra a dependência do fator de mérito da concentração de hematita. Os valores de *FM* foram calculados usando a Eq. 2 com os valores de E_{Abs} , *DOP* e M_c da Tabela 1. A amostra com maior valor de *FM* foi a de hematita a 7% (A07).

Figura 2 - Dependência do fator de mérito da concentração de hematita.



A Figura 3 mostra uma amostra com hematita a 7% após o teste de absorção de energia. Pode-se ver fios primários e secundários deformados devido à

deformação prolongada em toda a amostra, sugerindo uma força de arrancamento moderada.

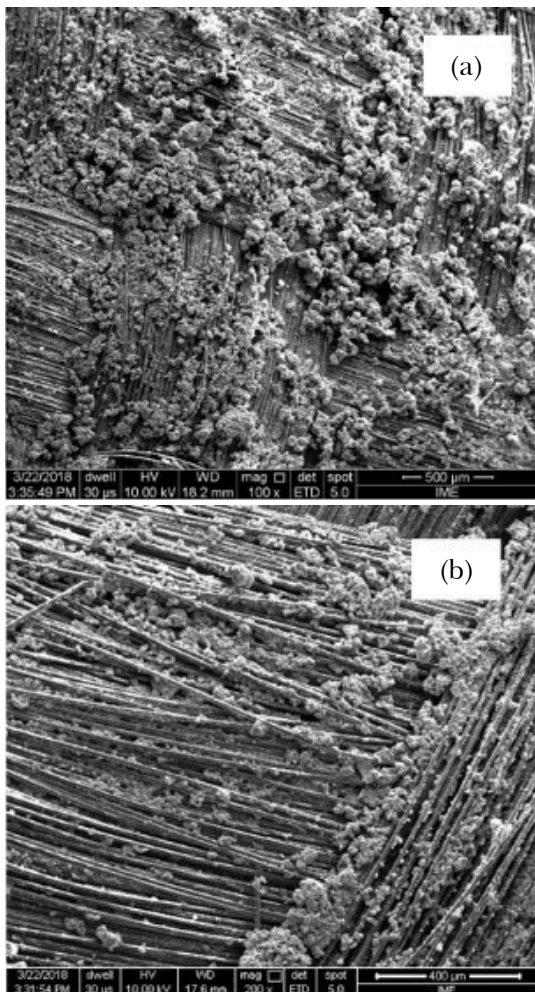
Figura 3 - Amostra com hematita a 7% após o teste de absorção de energia.



3.5 Imagens de microscópio eletrônico de varredura (MEV) de uma amostra A07

A Figura 4 mostra imagens de MEV de uma amostra com hematita a 7% (A07) antes e depois do teste balístico. Antes do ensaio balístico (a), há um excesso de carga que não impregna os fios de aramida e, portanto, não contribui significativamente para a resistência balística; e após o teste balístico (b), quase não há excesso de carga, exceto no canto inferior direito da imagem, onde se pode ver um agrupamento provavelmente devido ao impacto[26]. As regiões de impacto, que não são mostradas, estão na direção do canto superior esquerdo das imagens.

Figura 4 - Imagem MEV de amostras com hematita a 7% (a) antes e (b) após o impacto.



3.4 Medidas de refletividade/absorção

Conforme mostrado na Figura 5, a perda dielétrica ϵ''/ϵ' é máxima e a perda de refletividade é mínima para uma concentração de 3% de hematita. De acordo com Huo et al.[31], isso se deve ao fato de que, para concentrações de hematita maiores que 3%, a profundidade da pele torna-se muito pequena devido ao aumento da condutividade e a maior parte da onda eletromagnética é refletida. Conforme mostrado na Figura 6, a perda magnética μ''/μ' é máxima para hematita 11% em peso na faixa de frequência de 8,2 a 11,6 GHz, mas esse efeito não é suficiente para compensar a perda de reflexão causada pelo aumento da condutividade, mostrada na Figura 5 (a). É por isso que, de acordo com a Figura 5 (b), não apresenta o melhor desempenho em termos de refletividade.

Figura 5 - (a) Perda dielétrica e (b) perda de refletividade para aramida pura e aramida impregnada com um fluido de espessamento por cisalhamento (STF) com 3%, 7%, 11% e 17% de hematita.

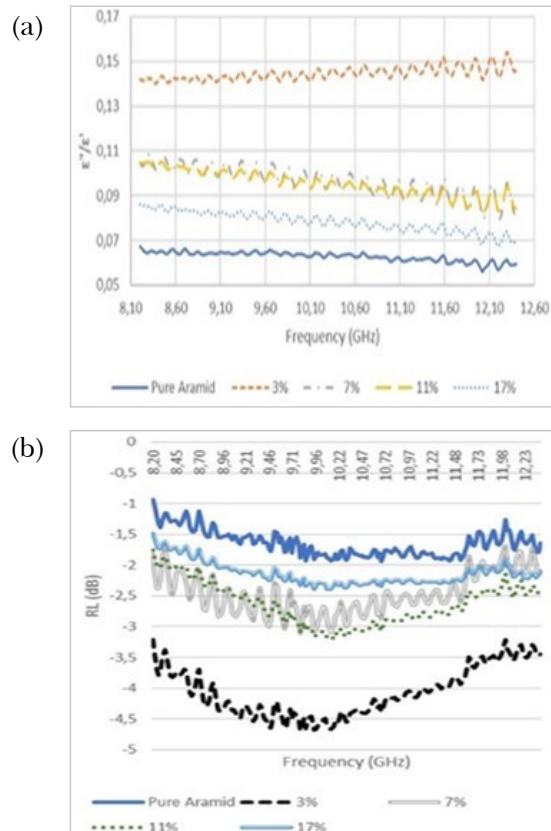
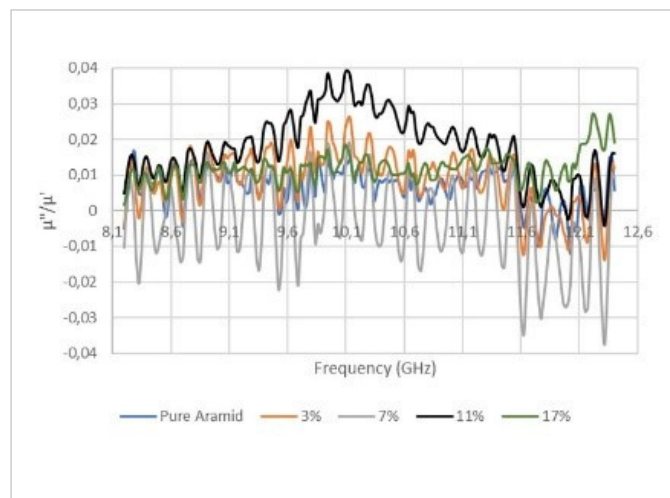


Figura 6 - Perda magnética para aramida pura e aramida impregnada com um SFT com 3%, 7%, 11% e 17% de hematita.



4. Conclusão

Os compósitos com 7% de hematita apresentaram o melhor comportamento balístico, enquanto os compósitos com 3% em peso e 11% de hematita apresentaram as melhores propriedades de absorção de micro-ondas em termos de perda dielétrica e magnética, respectivamente. Um meio-termo razoável entre resistência balística e absorção de micro-ondas parece ser o uso de tecido de aramida impregnado com 7% em peso de hematita.

Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo apoio financeiro.

Referências

- [1] CAVALLARO, P.V., Armadura macia: uma visão geral dos materiais, fabricação, teste e dinâmica de impacto balístico, 1º de agosto de 2011, Relatório Técnico NUWC-NPT 12.057
- [2] EGRES, R. G. Jr., LEE, Y.S., KIRKWOOD, J. E., KIRKWOOD, K. M., WETZEL E. D., WAGNER N.J. *Liquid armor: Protective fabrics utilizing shear thickening fluids*. In: IFAI INT. CONF. ON SAFETY AND PROTECTIVE FABRICS, 4. 2004, Pittsburgh. Conferência [...]. Pittsburgh, 2004.
- [3] EGRES, R.G. Jr., HALBACH, C.J., DECKER, M.J., WETZEL E.D., WAGNER N.J., Stab performance of shear thickening fluid (STF)-fabric composites for body armor applications, *Proceeding of SAMPE 2005: New Horizons for Materials and Processing Technologies*. Long Beach, CA., 2005.
- [4] BARNES, H. A., HUTTON, J.F., WALTERS, K., *An introduction to rheology*, Rheology Series 3, Elsevier, 1989.
- [5] MARANZANO, B.J., WAGNER, N.J., The effects of interparticle interactions and particle size on reversible shear thickening: Hard-sphere colloidal dispersions, *J. Chem. Phys.*, v. 114, p. 10514, 2001.
- [6] BRADY, J.F., The rheological behavior of concentrated colloidal dispersions, *J. Chem. Phys.*, v.99, p. 567, 1993.
- [7] KRISHNAMURTHY, L., WAGNER, N.J., Shear thickening in polymer stabilized colloidal dispersions, *J. Rheol.*, v. 49, p. 1347, 2005.
- [8] MARANZANO, B.J., NORMAN, J.W., The effects of particles size on reversible shear thickening of concentrated colloidal dispersions: Hard-sphere colloidal dispersions, *J. Rheol.*, v. 45, p. 1205, 2001.
- [9] GALINDO-ROSALES, F.J., RUBIO-HERNÁNDEZ, F.J., SEVILLA, A., An apparent viscosity function for shear thickening fluids, *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, v. 166, p. 321, 2011.
- [10] SUN, L. -L., XIONG, D. -S., XU, C.-Y., Application of shear thickening fluid in ultra high molecular weight polyethylene fabric, *J. Appl. Polym. Sci.*, v. 129, p. 1922, 2013.
- [11] MAJUMDAR, A., BUTOLA, B. S., SRIVASTAVA, A., Development of soft composite materials with improved impact resistance using Kevlar fabric and nano silica based shear thickening, *Mater. Des.*, v. 54, p. 295, 2014.
- [12] TEBER, A., UNVER, I., KAVAS, H., AKTAS, B., BANSAL, R., Knitted radar absorbing materials (RAM) based on nickel-cobalt magnetic materials, *J. Mag. Mag. Mat.*, v. 406, p. 228, 2016.
- [13] WU, Q.-M., RUAN, J.-M., HUANG, B.-Y., ZHOU, Z.C., ZOU J.-P., Rheological behavior of fumed silica suspension in polyethylene glycol, *J. Cent. South Univ. Technol.*, v. 13, p. 1, 2006.
- [14] GÜRGEN, S., LI, W., KUSHAN, M.C., The rheology of shear thickening fluids with various ceramic particle additives, *Mater. Des.*, v. 104, p. 312, 2016.
- [15] DECKER, M.J., HALBACH, C.J., NAM, C.H., WAGNER, N.J., WETZEL, E.D., Stab resistance of shear thickening fluid (STF)-treated fabrics, *Comp. Sci. Tech.*, v. 67, p. 565, 2007.

- [16] EGRES, R.G., DECKER, M.J., HALBACH, C.J., LEE, Y.S., KIRKWOOD, J.E., KIRKWOOD, K.M., WAGNER, N.J. Stab resistance of shear thickening fluid(STF) Kevlar composites for body armor applications, Proceeding of the 24th Army Science Conference, Orlando, FL, 2004.
- [17] DING, J., TRACEY, P.J., LI, W., PENG, G., WHITTEN, P.G. Review on shear thickening fluids and applications, *Textiles and Light Industrial Science and Technology*, v. 2, p. 161, 2013.
- [18] DE BIASI, R.S., FIGUEIREDO, A.B.S., FERNANDES, A.A.R., LARICA, C., Synthesis of cobalto ferrite nanoparticles using combustion waves, *Solid State Commun.*, v. 144, p. 15, 2007.
- [19] CAO, Z., QIN, M., JIA, B., GU, Y., CHEN, P., VOLINSKY, A.A., QU, X., One pot solution combustion synthesis of highly mesoporous hematite for photocatalysis, *Ceram. Int.*, v. 41, p. 2806, 2015.
- [20] LEE, Y.S., WETZEL, E.D., WAGNER, N.J., The ballistic impact characteristics of Kevlar woven fabrics impregnated with a colloidal shear thickening fluid, *J. Mater. Sci.*, v. 38, p. 2825, 2003.
- [21] PASQUALI, M., TERRA, C., GAUDENZI, P., Analytical modelling of high-velocity impacts on thin woven fabric composite targets, *Compos. Struct.*, v. 131, p. 951, 2015.
- [22] NAIK, N.K., SHRIRAO, P., Composite structures under ballistic impact, *Compos. Struct.*, vol. 66, p. 579, 2004.
- [23] NAIK, N.K., SHRIRAO, P., REDDY, B.C.K., Ballistic impact behaviour of woven fabric composites: Formulation, *Int. J. Impact Eng.*, vol. 32, p. 1521, 2006.
- [24] ALMUSALLAM, T.H., SIDDIQUI, N.A., IQBAL, R.A., ABBAS, H., Response of hybrid-fiber reinforced concrete slabs to hard projectile impact, *Int. J. Impact Eng.*, v. 58, p. 17, 2013.
- [25] WANG, J., CALLINAN, R., Residual strengths of composite structures subjected to ballistic impact, *Compos. Struct.*, v. 117, p. 423, 2014.
- [26] JORDAN, J.B., NAITO, C.J., Calculating fragment impact velocity from penetration data, *Int. J. Impact Eng.*, v. 37, p. 530, 2010.
- [27] BACKMAN, M.E., GOLDSMITH, W., The mechanics of penetration of projectiles into targets, *Int. J. Eng. Sci.*, v. 16, p. 1, 1978.
- [28] CARLUCCI, D.E.; JACOBSON, S.S. *Ballistics: theory and design of guns and ammunition*. Boca Raton [Florida]: CRC, 2008. 496 p. ISBN 1420066180.
- [29] ANDERSON JR., C.E., Analytical models for penetration mechanics: A Review, *Int. J. Impact Eng.*, v. 108, p. 3, 2017.
- [30] VILLANUEVA, G.R.; CANTWELL, W.J. The high velocity impact response of composite and FML-reinforced sandwich structures, *Comp. Sci. Tec.*, v. 64, p. 35-54, 2004.
- [31] HUO J., WANG L., YU H., Polymeric nanocomposites for electromagnetic wave absorption, *J. Mater. Sci.*, v. 44, p. 3917, 2009.

Influência do tratamento de superfície na estabilidade primária dos implantes dentários osseointegráveis quantificada com *strain gauge*

Larissa Ramos Xavier Coutinho Nascimento, larissa.nascimento@ime.eb.br, Orcid 0000-0001-6533-5598
Carlos Nelson Elias, elias@ime.eb.br, Orcid 0000-0002-7560-6926
Guilherme Monteiro Torelly, gtorelly@gmail.com, Orcid 0000-0003-3019-2069

RESUMO: São propostas várias hipóteses para explicar as falhas dos implantes dentários de titânio osseointegráveis. Entre as possíveis explicações destacam-se as alterações das propriedades mecânicas dos ossos maxilares, a técnica cirúrgica empregada com uso de torques excessivos, a forma inadequada dos implantes e o tratamento deficiente da superfície dos implantes. Os objetivos deste trabalho são medir a deformação no osso, quantificar o torque de inserção e analisar a influência do tratamento da superfície na estabilidade primária dos implantes dentários. Foram realizados ensaios de extensometria com o uso de *strain gauges* e determinado o torque de inserção dos implantes em osso sintético de poliuretano com densidade 30 PCF (0,48 g/cm³). Nos ensaios foram quantificadas as deformações no osso sintético e os torques máximo de inserção de implantes com a superfície tratada com duplo ataque ácido e sem tratamento (usinado). Os resultados mostraram que os implantes sem tratamento de superfície induzem maior deformação no osso, necessitam de menor torque de inserção, possuem menor estabilidade primária e em alguns ensaios induziram a formação de microtrincas no osso durante a inserção. Os implantes com superfície tratada com ácido apresentam melhor desempenho.

PALAVRAS-CHAVE: Implante dentário, Tratamento de superfície, Estabilidade primária.

ABSTRACT: There are several hypotheses to explain the failures of osseointegrated titanium dental implants. Some possible explanations are the alterations in the mechanical properties of the maxillary bones, the surgical technique employed with excessive torques, the inadequate shape of the implants, and the deficient treatment of the surface of the implants. This work aims to measure the strain in the bone, quantify the insertion torque, and analyze the influence of surface treatment on the primary stability of dental implants. Extensometry tests were performed using strain gauges, and the insertion torque of the implants in synthetic polyurethane bone with a density of 30 PCF (0.48 g/cm³) was determined. The tests quantified the deformations in the synthetic bone and the maximum insertion torques of implants with the surface treated with double acid etching and without treatment (machined). The results showed that implants without surface treatment induce greater bone deformation, require lower insertion torque, have lower primary stability, and, in some essays, induce microcracks formation in the bone during insertion. Implants with an acid-treated surface perform better.

KEYWORDS: Dental Implant, Surface Treatment, Primary Stability.

1. Introdução

A estabilidade primária (mecânica) dos implantes dentários é quantificada durante ou imediatamente após a instalação. Os trabalhos disponíveis na literatura não fornecem dados sobre o limite de tensão de compressão, que é transmitida ao osso durante a inserção dos implantes dentários. Durante a instalação do implante, a estabilidade primária pode ser medida pelo torque de inserção, com Periotest ou pela análise de frequência de ressonância (RFA). Desses métodos, a medição do torque de inserção é o mais simples e fornece dados mais precisos para estimar a estabilidade primária dos implantes. Com a medição do torque de inserção é

possível qualificar com mais facilidade a densidade óssea e a estabilidade primária no momento da cirurgia, em comparação com outros métodos. A estabilidade primária dos implantes é afetada por diversos fatores, dentre eles a forma do corpo, o diâmetro, o comprimento e o perfil da rosca [1,2,3].

A técnica cirúrgica, a quantidade e densidade óssea disponível e a morfologia da superfície do implante influenciam no sucesso ou falha dos implantes [2,3].

Nas últimas décadas surgiram mudanças de paradigmas sobre como as características da superfície dos biomateriais influenciam na resposta biológica. Tanto a microrrugosidade como a molhabilidade aumentam a energia de superfície, melhoram o contato celular e a osseointegração dos implantes de titânio. Os efeitos

sinérgicos das características da topografia em nano-escala, a molhabilidade e a qualidade da interface implante-osso são relevantes para o sucesso dos sistemas de implantes.

Os tratamentos das superfícies interferem no processo de osseointegração, na molhabilidade, rugosidade e morfologia. A rugosidade da superfície dos implantes altera a adesão e fixação das células osteogênicas. A rugosidade pode ser quantificada por vários parâmetros, sendo o Ra o mais usado, o qual representa o valor médio aritmético do tamanho dos picos e vales existentes na superfície em relação a uma linha média imaginária calculada. Quanto à dimensão da rugosidade dos implantes, pode-se dividi-la em três níveis: macrorrugosidade, microrrugosidade e nanorrugosidade. A macrorrugosidade com ordem de grandeza de milímetro não influencia na osseointegração, mas afeta a distribuição das forças para o osso e na estabilidade do implante [4]. Idealmente, a rugosidade (Ra) do corpo do implante necessária para a formação óssea é entre 1,0 e 2,0 μm [5]. Na região do segmento subepitelial, a rugosidade em torno de 1,0 μm (Ra) permite a adesão do tecido conjuntivo subepitelial. Para a região endóssea, a superfície do implante deve induzir a regeneração e a remodelação óssea, promover ótima distribuição de cargas, aumentar a área de contato e levar à máxima deposição celular [4].

A molhabilidade da superfície interfere no comportamento celular e é avaliada pelo ângulo de contato. A composição química e a energia de superfície são essenciais para a adesão dos osteoblastos, sendo a primeira fase de interação entre as células e o biomaterial, orientando a proliferação celular no contato com o implante. Diferentes tratamentos de superfície são usados para mudar a morfologia, a topografia, a rugosidade, a composição química, o nível de energia e diminuir o ângulo de contato para aumentar a osseointegração com a melhor ancoragem mecânica e biológica [3].

As superfícies dos implantes determinam as reações interfaciais primárias com os componentes do sangue, células ósseas, epiteliais e do tecido conjun-

tivo, como adsorção de macromoléculas, adesão celular, proliferação e diferenciação [5].

Durante a cirurgia, a cavidade preparada no osso para a inserção dos implantes dentários é preenchida com sangue, devido à ruptura de vasos sanguíneos danificados e trauma vascular no osso. A formação de coágulo de fibrina está associada à maioria dos processos de cicatrização de feridas e está ligada às reações iniciais de osseointegração. O coágulo sanguíneo serve de arcabouço à migração de células-tronco mesenquimais e secreção de enzimas fibrinolíticas. Este processo de migração para um arcabouço de tecido conjuntivo temporário é denominado osteocondução, sendo a primeira fase da osseointegração. Após a osteocondução, há formação do “novo osso” que é iniciada pela diferenciação de osteoblastos [5].

Os objetivos dos tratamentos das superfícies dos implantes são: reduzir o tempo de carregamento da prótese após a cirurgia; acelerar o crescimento e maturação óssea para permitir o carregamento imediato; aumentar a estabilidade primária; garantir o sucesso na aplicação em osso com menor densidade e quantidade; obter crescimento ósseo diretamente na superfície do implante; obter maior área possível de osseointegração; obter contato osso-implante sem a interposição de camadas proteicas amorfas; atrair células osteoblásticas, pré-osteoblásticas e mesenquimais; atrair proteínas de ligação específicas para células osteogênicas (fibronectina); e obter maior concentração possível de proteínas de ligação celular [3].

Os implantes orais moderadamente rugosos são os mais usados, com base nas evidências científicas de que essas superfícies proporcionam melhor resposta óssea. Uma tendência geral nos experimentos *in vivo* é que o aumento do valor do parâmetro de rugosidade S_a , o qual quantifica a altura média aritmética dos picos das irregularidades na superfície, aumenta a resistência ao cisalhamento interfacial [6]. Halldin *et al.* (2015) [6] estimaram a resistência ao cisalhamento da interface osso-implante para diferentes superfícies. Foi constatado que a superfície com S_a de 1,51 μm aumenta a resistência ao cisalhamento da interface osso-implante em 45% em relação à superfície com S_a de 0,91 μm após 12 semanas de cicatrização [7].

A modificação da superfície dos implantes é recomendada para aumentar a área de contato do implante com o osso, permitir melhor resistência ao cisalhamento da interface osso-implante e aumentar o coeficiente de atrito [8]. No entanto, o aumento das tensões no osso cortical, com o aumento da rugosidade da superfície nesta região deve ser devidamente avaliado para evitar a perda óssea ao redor do implante.

Tabassum *et al.* (2009) [9] mediram a rugosidade da superfície do implante e observaram por avaliação topográfica que a superfície usinada apresenta rugosidade superficial média ($R_a = 0,45 \mu\text{m}$) significativamente menor do que a superfície condicionada com ácido ($R_a = 1,47 \mu\text{m}$).

Neste trabalho é apresentada a proposta de avaliar a estabilidade primária dos implantes com superfície tratada e usinado com o uso de *strain gauge*. Esse dispositivo é utilizado em teste de extensometria para medir a deformação sofrida por um objeto. A deformação altera o comprimento do *strain gauge*, variando sua resistência elétrica. O *strain gauge* é conectado a um amplificador analógico-digital e ao software que quantifica a deformação sofrida pelo material [1].

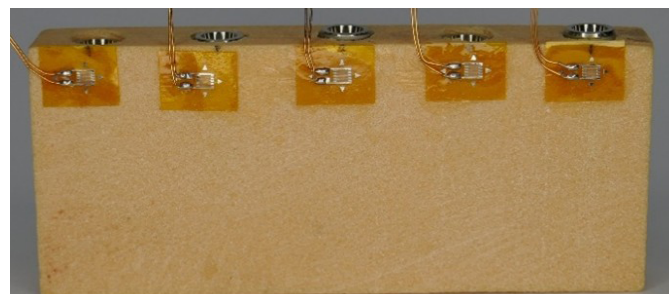
2. Material e método

Neste trabalho, implantes dentários foram inseridos em corpos de prova feitos de espuma rígida de poliuretano (NacionalOssos®, Jaú, São Paulo) de densidade 30 PCF ($0,48 \text{ g/cm}^3$) e módulo de elasticidade de 305,73 MPa, compatível com o osso natural D2. Corpos de prova na forma de paralelepípedo com largura de 50 mm e altura de 19 mm usados para inserir os implantes. Os implantes tinham 5 mm de diâmetro e o corpo de prova espessura de 7 mm. As propriedades dos blocos são discriminadas na norma ASTM F-1839-08 (Standard Specification for Rigid Polyurethane for use as a Standard Material for Testing Orthopaedic Devices and Instruments).

Strain gauges retangulares (Model PA-06-040 AB-120 - Excell Sensores, Taboão da Serra, São Paulo, Brazil) foram colados na borda superior dos corpos de prova (Figura 1). O eixo de medição foi alinhado perpendicularmente às perfurações. Essa configuração permitiu a

quantificação das deformações resultantes da tensão de compressão, durante a inserção dos implantes. Em cada bloco de poliuretano foram instalados cinco implantes, com espaçamento de 10 mm entre eles.

Figura 1 - *Strain gauges* colados no corpo de prova



Dois modelos de implantes (Figura 2) com dois tratamentos de superfície foram usados. Os implantes Easy-Grip com superfície Porous® com duplo ataque ácido e o implante usinado Master Screw da empresa Conexão Sistema de Prótese (Arujá, São Paulo). O objetivo foi comparar a influência do tratamento da superfície no torque de inserção e na deformação do corpo de prova de poliuretano.

Figuras 2 - a) Implante Easy Grip 5x15mm com a superfície Porous; b) Implante Easy Grip instalado no corpo de prova; c) Implante usinado (Master Screw)

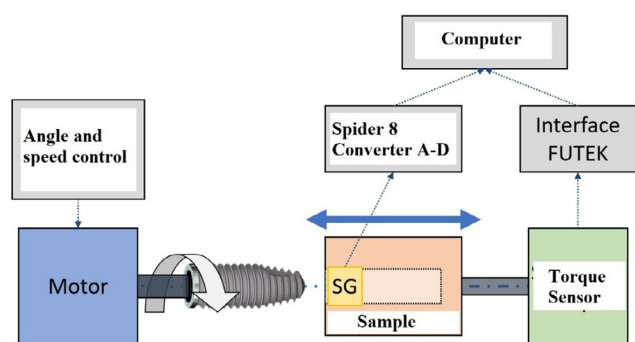


Os implantes com diâmetro 5,0 mm e comprimento de 15,0 mm foram inseridos em cavidades preparadas com a perfuração inicial realizada com broca piloto de 2,0 mm de diâmetro e rotação de 1.200 rpm. A seguir foram usadas as brocas de 2,5, 3, 3,5, 4 e 4,5 mm diâmetro.

O bloco foi fixado em um torquímetro digital TSS400 (FUTEK, Irvine, CA, USA) com capacidade de 113 N.cm. A perfuração para inserção do implante foi

alinhada ao eixo de rotação do motor. Os *strain gauges* foram conectados à interface analógico-digital-Spider 8 (HBM – Darmstadt- Germany). Este sistema foi configurado para uma taxa de aquisição de dados de 50 Hz, com resolução de 16 bits. Os implantes foram inseridos por um motor de passo com rotação constante de 25 rpm. Mostra-se na Figura 3 o esquema dos procedimentos.

Figura 3 - esquema de montagem do experimento



3. Resultados

Os resultados obtidos através dos ensaios de extensometria são apresentados nas Figura 4 e 5 e na Tabela 1. Foi possível observar que as superfícies dos implantes com superfícies tratadas apresentaram maior deformação plástica, induziram menor tensão no osso e necessitaram de maior torque de inserção.

Figura 4 - Curvas da variação da deformação plástica e do torque durante a instalação dos implantes sem tratamento de superfície (Master Screw)

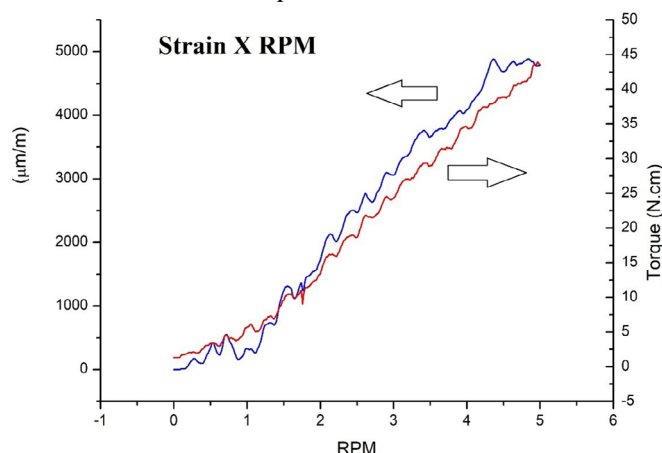


Figura 5 - Curvas da variação da deformação plástica e do torque durante a instalação dos implantes com tratamento de superfície (superfície Porous)

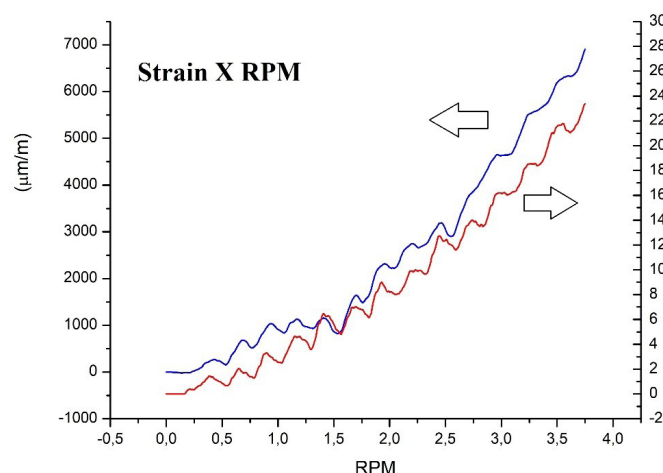


Tabela 1 - Deformação, torque de inserção e tensão de compressão durante a instalação dos implantes no osso sintético

| IMPLANTES | Deformação Média - ϵ (‰) | Torque Médio (N.cm) | σ (MPa) |
|--------------|-----------------------------------|---------------------|----------------|
| Easy Grip | 5,73 ± 2,86 | 53,9 ± 12,3 | 1,753 |
| Master Screw | 6,47 ± 2,48 | 43,6 ± 7,5 | 1,987 |

4. Discussão

A rugosidade superficial dos implantes reduz o tempo de cicatrização óssea, proporciona maior travamento mecânico e aumenta a estabilidade primária [2].

O implante Master Screw usinado possui ranhuras circulares oriundas do processo de fabricação. A superfície dos implantes com ataque ácido (superfície Porous) é mais homogênea que a superfície usinada. O tratamento de superfície altera significativamente os parâmetros de rugosidade, que influenciam a interação da superfície com as proteínas e células, induzindo a osteogênese, o que pode ser avaliado pelo torque de remoção do implante [2].

Elias *et al.* (2012) [2] obtiveram um torque de inserção de 45,86 N.cm para instalação de implantes

usinados Master Screw de 3,75 x 13 mm em espuma de poliuretano. Os autores enfatizam que os implante de superfície usinada tem o menor torque de inserção quando comparados aos de superfícies tratadas. Isto se deve à menor rugosidade da superfície [1]. O torque de inserção para o implante condicionado com ácido é maior que o do implante usinado e menor que o do implante anodizado. Os implantes com superfícies tratadas apresentaram maior rugosidade, coeficiente de atrito e torque de inserção do que os implantes usinados. Os resultados da rugosidade da superfície e dos coeficientes de atrito concordam com os resultados do torque de inserção. Os autores concluem que, com base nos resultados, a superfície anodizada do implante dentário pode ser considerada a melhor superfície para osseointegração e estabilidade primária [2].

A modificação da superfície dos implantes é recomendada para aumentar a área de contato osso-implante, permitir maior resistência às forças de cisalhamento e maior coeficiente de atrito [9].

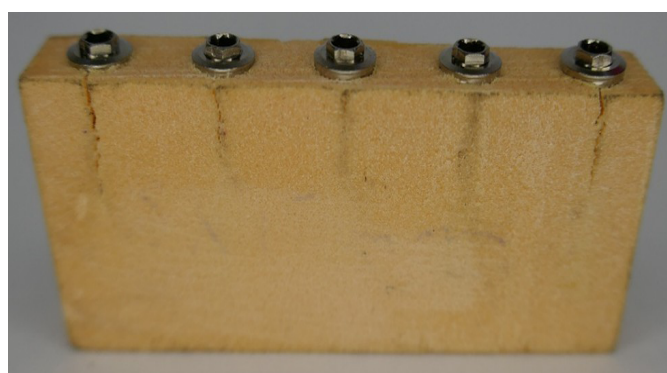
Santiago Junior *et al.* (2016) [10] observaram que os implantes com tratamento de superfície induzem maior tensão e deformação no osso cortical do que os implantes usinados. Porém, há melhor distribuição da tensão axial no osso perimplantar. Os autores atribuem este resultado ao aumento da área dos implantes com superfície tratada.

Veis *et al.* (2017) [11] recomendam o uso de implantes com superfície rugosa para melhorar a estabilidade primária. Os autores acrescentam que a morfologia da superfície de um implante influencia na taxa e na extensão da fixação osso-implante, que é expressa pela quantidade de contato osso-implante (BIC). Em locais de baixa densidade óssea, os implantes com superfície tratada com ácido são os indicados.

Bahrami *et al.* (2014) [12] analisaram por meio da análise de elementos finitos, o efeito dos tratamentos de superfície na distribuição de tensões na interface osso-implante em implantes inseridos na mandíbula com carga imediata. As superfícies dos implantes foram divididas com base no coeficiente de atrito: polida (CA = 0,4), plasma *spray* (CA = 1,0), jateado (CA = 0,68), implante com rugosidade na região coronal polida (CA = 0,4) e tratada com plasma *spray* (CA = 1). O aumento

na rugosidade das superfícies do implante aumenta as tensões máximas no osso cortical e o aumento no coeficiente reduz os níveis de tensão na interface com o osso trabecular. O uso de uma técnica de tratamento de superfície em duas partes, com baixo coeficiente de atrito na interface com o osso cortical e maior coeficiente de atrito na interface com o osso trabecular, permite otimizar os níveis de tensão na interface osso-implante.

Figura 6 - Corpo de prova mostrando trincas após a inserção dos implantes usinados (Master Screw)



Neste trabalho, os implantes usinados induziram maior deformação no osso e foram inseridos com menor torque quando comparados aos implantes com superfície com ataque ácido (Porous). Além disso, foram observadas trincas no osso sintético após a instalação dos implantes usinados.

Os dados deste trabalho são diferentes dos encontrados na literatura. Uma explicação para essa contradição é que, nos trabalhos disponíveis na literatura, a tensão no osso é calculada a partir da aplicação força de carregamento axial e oblíqua no pilar do implante. No entanto, nesta pesquisa determinou-se a tensão de compressão circunferencial durante a inserção do implante. A tensão é melhor distribuída pelo aumento da área da superfície dos implantes com tratamento de superfície, e o maior torque pode ser atribuído ao coeficiente de atrito provocado pelo incremento da rugosidade.

5. Conclusão

Os resultados obtidos neste trabalho mostram que:

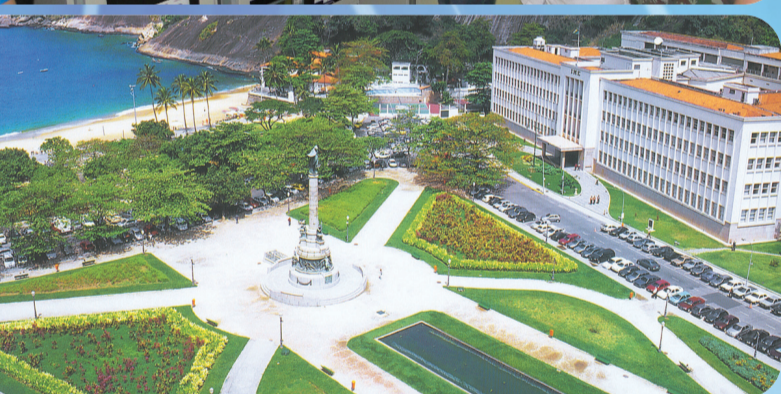
- a. Os implantes usinados induzem maior deformação e tensão de compressão no osso e necessitam

- de menor torque de inserção. Este resultado pode ser atribuído à menor área de contato osso-implante e à menor força de atrito.
- b. Os implantes usinados induziram a formação de trincas no osso durante a inserção, devido à menor distribuição das tensões no osso sintético.
- c. Os implantes com superfície tratada com duplo ataque ácido (Porous) induzem menor deformação e tensão no osso durante a inserção, minimizam os riscos de compressão excessiva, necrose óssea e microfraturas, que levariam à perda do implante.

Referência

- [1] ATSUMI, M.; PARK, S.-H.; WANG, H.-L. Methods used to assess implant stability: current status. **International Journal of Oral & Maxillofacial Implants**, Lombard, v. 22, n. 5, 2007.
- [2] ELIAS, C. N.; ROCHA, F. A.; NASCIMENTO, A. L.; COELHO, P. G. Influence of implant shape, surface morphology, surgical technique and bone quality on the primary stability of dental implants. **Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials**, Amsterdam, v. 16, p. 169-180, 2012.
- [3] ELIAS, C. N.; OSHIDA, Y.; LIMA, J. H. C.; MULLER, C. A. Relationship between surface properties (roughness, wettability and morphology) of titanium and dental implant removal torque. **Journal of Mechanical Behavior of Biomedical Materials**, Amsterdam, v. 23, n. 4, p. 234-242, 2008.
- [4] ELIAS, C. N.; LIMA, J. H. C.; SANTOS, M. V. Modificações na superfície dos implantes dentários: da pesquisa básica à aplicação clínica. **Implant News**, [s. l.], p. 467-476, 2008.
- [5] RUPP, F.; LIANG, L.; GEIS-GERSTORFER, J.; SCHEIDELER, L.; HÜTTIG, F. Surface characteristics of dental implants: A review. **Dental Materials**, Kidlington, v. 34, n. 1, p. 40-57, 2018.
- [6] HALLDIN, A.; ANDER, M.; JACOBSSON, M.; HANSSON, S. Simulation of the mechanical interlocking capacity of a rough bone implant surface during healing. **Biomedical Engineering Online**, [s. l.], v. 14, p. 45, 2015.
- [7] GOIATO, M. C.; SANTOS, D. M.; SANTIAGO, J. J.; MORENO, A.; PELLIZZER, E. P. Longevity of dental implants in type IV bone: a systematic review. **International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery**, Copenhagen, v. 43, n. 9, p. 1108-1116, 2014.
- [8] HUANG, H. L.; HSU, J. T.; FUH, L. J.; LIN, D. J.; CHEN, M. Y. Biomechanical simulation of various surface roughnesses and geometric designs on an immediately loaded dental implant. **Computers in Biology and Medicine**, New York, v. 40, n. 5, p. 525-532, 2010.
- [9] TABASSUM, A.; MEIJER, G. J.; WOLKE, J. G.; JANSEN, J. A. Influence of the surgical technique and surface roughness on the primary stability of an implant in artificial bone with a density equivalent to maxillary bone: a laboratory study. **Clinical Oral Implants Research**, Copenhagen, v. 20, n. 4, p. 327-332, 2009.
- [10] SANTIAGO JUNIOR, J. F. S.; VERRI, F. R.; FARIA ALMEIDA, D. A.; SOUZA BATISTA, V. E.; LEMOS, C. A. A.; PELLIZZER, E. P. Finite element analysis on influence of implant surface treatments, connection and bone types. **Materials Science and Engineering: C**, Amsterdam, v. 63, p. 292-300, 2016.
- [11] VEIS, A. A.; PAPADIMITRIOU, S.; TRISI, P.; TSIRLIS, A. T.; PARISSIS, N. A.; KENEALY, J. N. Osseointegration of Osseotite and machined-surfaced titanium implants in membrane-covered critical sized defects: a histologic and histometric study in dogs. **Clinical Oral Implants Research**, Hoboken, v. 18, p. 153-160, 2007.
- [12] BAHRAMI, B.; SHAHRBAF, S.; MIRZAKOUCHAKI, B.; GHALICHI, F.; ASHTIANI, M.; MARTIN, N. Effect of surface treatment on stress distribution in immediately loaded dental implants—A 3D finite element analysis. **Dental Materials**, Kidlington, v. 30, n. 4, p. e89-e97, 2014.





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 – sd1@ime.eb.br