



REVISTA MILITAR de CIÊNCIA e TECNOLOGIA

Versão impressa: ISSN 0102-3543

Volume XXXVIII - 1º Trimestre de 2021

ENGENHARIA MILITAR

**Mobilidade,
Contramobilidade e
Proteção**

Análise das diferentes distribuições de pressão sob carros de combate – Pág 03

Prospecção tecnológica utilizando análise de patentes e o método AHP: estudo de caso dos materiais de carbono para o setor de defesa – Pág 14

Propriedades óticas de filmes de CIGS depositados à temperatura ambiente por pulverização catódica a partir de um alvo quaternário – Pág 31

Avaliação de desempenho de Redes Tolerantes a Interrupções na troca de mensagens táticas entre navios de guerra – Pág 37

Implementação de um controle preditivo baseado em modelo adaptativo na otimização da trajetória de um veículo militar – Pág 48

Propriedades magnéticas de ferritas mistas MnZnFeO_4 e MnAlFeO_4 : um estudo comparativo – Pág 54

Compósito de alumina e polietileno de baixa densidade, uma alternativa de aplicação em proteção balística – Pág 61





REVISTA MILITAR DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

COMANDANTE DO EXÉRCITO:
Gen Ex Edson Leal Pujol

DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA:
Gen Ex Décio Luís Schons

DEPARTAMENTO DE EDUCAÇÃO E CULTURA DO EXÉRCITO:
Gen Ex Tomás Miguel Miné Ribeiro Paiva

BIBLIOTECA DO EXÉRCITO:
Cel Art Eduardo Biserra Rocha

CORPO REDATORIAL:

• Comandante do IME: Gen Bda Armando Morado Ferreira • Editor geral: Marcelo de Miranda Reis – IME (SE/2) • Editor adjunto: Paulo Henrique Coelho Maranhão – IME (SE/4) • Editor executivo: Cel R1 Leocir Dal Pai – BIBLIEx • Engenharia Civil, Transportes e Ciências Ambientais: Filipe Almeida Corrêa do Nascimento – IME (SE/2) • Engenharia Nuclear: Sérgio de Oliveira Vellozo – IME (SE/7) • Engenharia Elétrica: Antônio Eduardo Carrilho da Cunha – IME (SE/3) • Engenharia Mecânica: André Luiz Tenório Rezende – IME (SE/4) • Ciência dos Materiais: André Ben-Hur da Silva Figueiredo – IME (SE/8) • Ciência da Computação: Paulo Cesar Salgado Vidal – IME (SE/9) • Engenharia de Defesa: Antônio Eduardo Carrilho da Cunha – IME (SE/10) • Engenharia Química e Química: Kátia Regina de Souza – IME (SE/5) • Engenharia Cartográfica: Matheus Pinheiro Ferreira – IME (SE/6) • Outras áreas: Aderson Campos Passos – IME (SE/9).

EDITORES ASSOCIADOS EXTERNOS:

• Dr. André Fenili – Universidade Federal do ABC, Santo André, SP • Dr. Artur Ziviani – Lab. Nacional de Computação Científica (LNCC), Petrópolis, RJ • 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

COMPOSIÇÃO:

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA - IME

Praça General Tibúrcio, 80 - Praia Vermelha - Rio de Janeiro-RJ - CEP 22.290-270 - Tel.: (21) 2546-7115

Website: <http://rmct.ime.eb.br> - Email: rmct@ime.eb.br

REVISÃO, PROGRAMAÇÃO E DIAGRAMAÇÃO:

Coordenador: Rubenildo Pithon de Barros • Revisores: Giana Elvira de Oliveira Marquês; Juniellen de Oliveira Seipel; Diego Ribeiro Ferreira Serpa • Plataforma OJS: Lucas Sebastião de Paula; Vanessa Ferreira Belchior • Diagramador: Luiz Tadeu Carqueija Mota

PROJETO GRÁFICO:
BIBLIEx

PUBLICAÇÃO TRIMESTRAL



Desde 1949

"A Gráfica do Exército" - Compromisso com a Qualidade

Impresso na Gráfica do Exército

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

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

E-mail: divmcl@graficadoexercito.eb.mil.br



REVISTA MILITAR de CIÊNCIA e TECNOLOGIA

REVISTA MILITAR DE CIÊNCIA E
TECNOLOGIA - Volume XXXVII

1º Trimestre de 2021

Direção, edição e distribuição:

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 NOSSAS REVISTAS DIGITAIS



Nossa capa:

Homenagem ao Corpo de Engenheiros





Prezados leitores da comunidade que busca a pesquisa e o desenvolvimento científico-tecnológico de interesse do Exército e do País, no tocante à Estratégia Nacional de Defesa, reiniciamos um ciclo com a primeira edição do ano de 2021. Como em todo recomeço nos enchemos de esperança de realizar um trabalho melhor, motivados pelo desafio que se renova.

Na edição do último trimestre brindamos o nosso público com assuntos de quatro áreas do conhecimento: Engenharia Civil, Engenharia Mecânica, Química e Engenharia de Materiais, com destaque para pesquisa do emprego de catalisadores de ródio suportado em zircônia e titânia na reação de hidrodesoxigenação do fenol, usado como molécula modelo do bio-óleo.

Nesse ano, já iniciamos a integração da revista ao formato “Open Journal System”, usando esse software livre para gerenciamento e publicação de periódicos científicos.

Nessa edição, a pesquisa na área de Engenharia Mecânica focou na análise das diferentes distribuições de pressão sob carros de combate e na Implementação de um controle preditivo para otimização da trajetória de um veículo militar. No campo Inovação foi estudada a Prospecção tecnológica utilizando análise de patentes e o método AHP. Na pesquisa de materiais para Indústria de defesa foram analisadas as propriedades óticas de filmes de CIGS depositados à temperatura ambiente por pulverização catódica e as propriedades magnéticas de ferritas mistas $MnZnFeO_4$ e $MnAlFeO_4$. Além disso foi estudada uma alternativa de aplicação em proteção balística pelo uso do compósito de alumina e polietileno de baixa densidade. E para o sistema de comando e controle das operações militares, foi avaliado o desempenho de Redes Tolerantes a Interrupções na troca de mensagens táticas entre navios de guerra.

O hábito da leitura estimula a criatividade, incita diferentes partes do cérebro e ajuda a reduzir o estresse. Esperamos que nossos textos ajudem como alívio as tensões atualmente vividas em função da pandemia do COVID-19. Boa leitura!

Marcelo de Miranda Reis

SUMÁRIO

03

- Análise das diferentes distribuições de pressão sob carros de combate

Matias Miguel Peleity Pinto, Ricardo Teixeira da Costa Neto

14

- Prospecção tecnológica utilizando análise de patentes e o método AHP: estudo de caso dos materiais de carbono para o setor de defesa

Fernanda Castello Branco Madeu, Paulo César Pellanda, Aderson Campos Passos

31

- Propriedades óticas de filmes de CIGS depositados à temperatura ambiente por pulverização catódica a partir de um alvo quaternário

Paulo V. N. Costa, Rodrigo A. Medeiro, Carlos L. Ferreira, Leila R. Cruz

37

- Avaliação de desempenho de Redes Tolerantes a Interrupções na troca de mensagens táticas entre navios de guerra

Davi Marinho de A Falcão, Ronaldo Moreira Salles, Paulo Henrique Coelho Maranhão

48

- Implementação de um controle preditivo baseado em modelo adaptativo na otimização da trajetória de um veículo militar

Marcelo Andrés Acuña, Gustavo Simão Rodrigues, Elias Dias Rossi Lopes

54

- Propriedades magnéticas de ferritas mistas MnZnFeO_4 e MnAlFeO_4 : um estudo comparativo

R S de Biasi, G B M Melo, M Torquato, D G Carvalho, M L N Grillo, A B S Figueiredo

61

- Compósito de alumina e polietileno de baixa densidade, uma alternativa de aplicação em proteção balística

Márcio J Oliveira, Alaelson Vieira Gomes André Rocha Pimenta

Análise das diferentes distribuições de pressão sob carros de combate

Matias Miguel Peleitary Pinto*, Ricardo Teixeira da Costa Neto

Instituto Militar de Engenharia (IME)

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

*mpeleitary@gmail.com

RESUMO: É apresentado um modelo matemático que permite analisar a resposta do perfil da distribuição de pressão sob rodas de apoio de carros de combate com lagartas. Em cada simulação pode-se avaliar quais das distribuições conduzem ao melhor desempenho. Cada um dos perfis de distribuição de pressão é usado no mesmo modelo de carro de combate (VBTP M113), considerando o mesmo terreno deformável, iguais condições de simulação e observando a resposta do veículo em cada caso. O modelo permite dimensionar a influência do valor do coeficiente de coesão na determinação da resistência de terraplanagem analisando o desempenho do veículo segundo os parâmetros de rendimento. Os resultados são comparáveis com os apresentados na literatura, validando a resposta do modelo matemático.

PALAVRAS-CHAVE: dinâmica longitudinal, fluxo de potência, carro de combate, solos deformáveis, distribuição de pressão, veículos sobre lagartas.

ABSTRACT: In this work is introduced a mathematical model that allows to evaluate the performance of a military tracked vehicle considering different types of ground pressure distribution profiles. In each case, it's possible evaluate which of the ground pressure distribution profiles leads to the best performance. Each of the profiles is used in the same vehicle model (APC M113), considering the same deformable terrain, the same simulation conditions and observing the APC behavior in each case. This model allows to verify the influence of the soil cohesion coefficient value in the determination of the bulldozer resistance by analyzing the vehicle's performance according to the efficiency parameters. The results are comparable to those presented in the references, validating the mathematical model.

KEYWORDS: longitudinal dynamics, power flow, Main Battle Tank, deformable soils, pressure distribution, tracked vehicles.

1. Introdução

rente à necessidade de realizar melhorias no desempenho de veículos, particularmente nesse caso de um carro de combate, são desenvolvidos modelos matemáticos que representem, da melhor maneira possível, o comportamento do veículo. Neste trabalho é desenvolvido um modelo matemático que reproduz o comportamento dinâmico de um carro de combate trafegando em dois tipos de solos de consistências díspares.

A dinâmica longitudinal deve considerar toda a cadeia cinemática do veículo [1]-[3], desde o torque produzido pelo motor até a força de tração transmitida pela lagarta, produto da interação com o solo. Também é necessário considerar as forças de resistência ao movimento, as quais são divididas em forças internas, que dependem do perfil do carro, e forças externas,

próprias das características do entorno onde se o veículo se desloca, que, no caso avaliado neste trabalho, em solo deformável. Tais forças externas são regidas pelas propriedades mecânicas dos solos, que impõem severas limitações à mobilidade dos veículos. O solo deformável apresenta comportamento plástico e é usada a teoria do equilíbrio plástico para determinar o que ocorre na interação com a lagarta.

Ao longo dos anos, foram desenvolvidos métodos empíricos e teóricos, buscando solucionar esse problema, os quais tentavam prever o desempenho de veículos sobre lagarta em terrenos deformáveis [4]-[6]. O pioneiro desses estudos foi Bekker [5], que desenvolveu uma técnica para determinar experimentalmente parâmetros que representam o comportamento dos solos segundo suas propriedades mecânicas [5]. Os parâmetros dos solos empregados neste trabalho são apresentados na **tabela 1**.

Tab.1 – Parâmetros dos solos

Ordem	Tipo de Solo	n	c	K
1	Argila pesada	0,1	1,18	103,27
2	Argila	1,0	20,68	814,3

Fontes: [4] e [8]

Baseado em resultados empíricos, Bekker [5] afirma que o comportamento da lagarta em um determinado terreno se assemelha ao de uma placa rígida. Empregando as **equações 1 e 2**, calcula-se o afundamento (z_0) e a resistência ao movimento devida à compactação do solo (R_c).

$$z_0 = \left(\frac{\frac{w}{bl}}{\frac{k_c}{b} + k_\phi} \right)^{1/n} \quad (1)$$

$$R_c = \frac{1}{(n+1)b^{1/n} * \left(\frac{k_c}{b} + k_\phi \right)^{1/n}} \left(\frac{w}{l} \right)^{\frac{(n+1)}{n}} \quad (2)$$

Nas **equações 1 e 2**, K_c , K_ϕ , n são parâmetros característicos do solo; b e l são, respectivamente, largura e comprimento da lagarta e w é a massa do veículo.

Uma das limitações da proposta inicial de Bekker [5] é que sua metodologia orienta à aplicação de distribuição uniforme de pressão. Entretanto, a distribuição da pressão sob a lagarta do carro de combate pode ser representada por uma função diferente, relacionada aos parâmetros de projeto de cada tipo de veículo e a forma como a carga é transferida ao solo. Esses parâmetros estão sujeitos às características de cada veículo, tais como a quantidade e o diâmetro das rodas de apoio, a distância entre tais rodas, as dimensões da lagarta, o sistema de suspensão, o sistema de regulação da tensão da lagarta, a posição do centro de gravidade, dentre outros [7].

O desempenho de veículos em terreno deformável é um problema central em assuntos relacionados à mobilidade, motivo pelo qual é necessário focar na interação veículo-solo a partir da perspectiva da

tração [4], e uma das questões é definir a distribuição da pressão no solo para posteriormente determinar a força de tração. Contudo, nem sempre se consegue medir a distribuição de pressão, sendo então necessário estimá-la.

Para calcular a força de tração desenvolvida por um veículo sobre lagartas em solo deformável, é necessário usar o critério de Morh Coulomb [6], que considera que a falha do solo se dá pelo cisalhamento e pode ser representada pela **equação 3**, que expressa o esforço cisalhante máximo produzido na interação entre a lagarta e o solo.

$$\tau_{max} = (c + \sigma \operatorname{tg} \phi) \quad (3)$$

Na **equação 3**, σ representa a distribuição de pressão, c e ϕ são parâmetros do solo, coeficiente de coesão e ângulo de atrito respectivamente. Pode-se demonstrar empiricamente o movimento do solo sob a lagarta, representado pela função exponencial da **equação 4** apresentada por Janosi e Hanamoto [4], sendo que j representa o deslocamento de cisalhamento e K é o módulo de deformação de tensões.

$$\tau = (c + \sigma \tan \phi) \left(1 - e^{-\frac{j}{K}} \right) \quad (4)$$

De Wong [4], tem-se que o deslizamento ou slip (i) e o deslocamento de cisalhamento (j) são definidos, respectivamente, segundo as **equações 5 e 6**,

$$i = 1 - \frac{V_v}{V_t} \quad (5)$$

$$j = V_j t \quad (6)$$

sendo V_v a velocidade longitudinal do veículo, V_j a velocidade real da polia tratora, V_t a diferença entre a velocidade teórica e a velocidade do veículo, e t o tempo de contato de um ponto determinado com o solo. Considerando o deslocamento em velocidade constante, tem-se a relação cinemática,

$$t = \frac{x}{V_t} \quad (7)$$

e arrumando as **equações (5), (6) e (7)** pode se

rescrever a **equação 8**:

$$j = ix \quad (8)$$

Considerando as **equações de 1 a 8**, determina-se a força de tração (F_t) produzida na interação da lagarta com o solo (9) e também a força Drawbar Pull (DP) (10), que são consideradas no modelo matemático apresentado.

$$F_t = b \int (c + \sigma \operatorname{tg} \phi) \left(1 - e^{\frac{-j}{K}}\right) dx \quad (9)$$

$$DP = F_t - \sum R \quad (10)$$

A força *drawbar pull* (DP) é a diferença existente entre a F_t e as forças de resistência, R , que se opõem ao movimento do veículo [9], e representa sua capacidade de puxar um reboque/semirreboque.

Segundo Kogure [11], o empuxo total do solo (H_{solo}) é igual ao momento aplicado na polia tensora dividido por seu raio, **equação 11**.

$$H_{\text{solo}} = \frac{T_{\text{roda}}}{r_{\text{roda}}} = F_t \quad (11)$$

Da **equação 4** tem-se a interação da lagarta com o solo, que depende da distribuição de pressão (σ) que produz essencialmente o esforço de cisalhamento (τ); este afetado pelo deslocamento por cisalhamento ($j(x)$), que por sua vez é calculado em função da posição da lagarta [12]. Portanto, é necessário avaliar os possíveis perfis de distribuição de pressão ao longo do comprimento da lagarta apoiado sobre o terreno, e influência no desempenho do veículo.

Na situação de não haver dados experimentais para descrever a distribuição de pressão de um veículo, deve-se estimar uma função matemática para representá-la. Devido à diversidade de veículos, nem sempre se consegue determinar uma única função que represente a distribuição de pressão comum a

todos os carros, e então parte-se para determinar a função que melhor se adapta a cada veículo.

Há diferentes tipos de distribuição de pressão que podem ser considerados, dependendo das propriedades geométricas do veículo. Inicialmente, Bekker [5] representa um perfil de distribuição de pressão uniformemente distribuída (**figura 1**).



Fig. 1 – Distribuição de pressão uniforme – VBTP M113 [14].

$$\sigma = \frac{w}{bl} \quad (12)$$

$$F_t = (Ac + w \cdot \operatorname{tg} \phi) * \left(1 - e^{\frac{-j}{K}}\right) \quad (13)$$

O perfil de distribuição de pressão do M113 pode ser considerado uniforme devido às suas características, pois sua massa é bem distribuída ao longo de seu comprimento.

Wong [9] apresenta outros perfis de distribuição de pressão e suas respectivas forças de tração para a análise da resposta dos veículos de lagarta, tais como distribuição de pressão senoidal (**figura 2**), linear decrescente (**figura 3**), linear crescente (**figura 4**), e senoidal com máxima pressão na linha vertical do centro de gravidade do carro (**figura 5**). Cada perfil é estimado de acordo com o tipo de veículo. Na **figura 2** é representado um T-72, carro de combate russo desenvolvido no início na década de 1970. Sua arquitetura resulta em uma distribuição de peso tal que a pressão sobre o solo é maior sob cada roda de apoio, decrescendo entre elas. As ilustrações dos

veículos são de [14].



Fig. 2 – Distribuição de pressão senoidal, T-72 [14].

$$\sigma = \frac{w}{bl} \left(1 + \cos \frac{2n\pi x}{l} \right) \quad (14)$$

$$F_t = \frac{w}{bl} \operatorname{tg} \phi \left(1 + \cos \frac{2n\pi x}{l} \right) \left(1 - e^{\frac{-ix}{K}} \right) \quad (15)$$

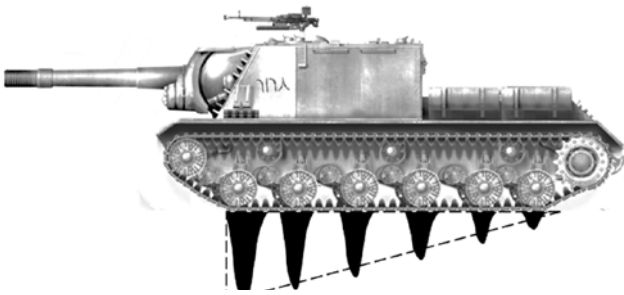


Fig. 3 – Distribuição de pressão linear decrescente – ISU 152 [14].

$$\sigma = \frac{2w(l-x)}{bl} \frac{1}{l} \quad (16)$$

$$F_t = (2w \operatorname{tg} \phi) \left(1 - \frac{K}{il} \left(1 - e^{\left(\frac{-il}{K} \right)} \right) + \right. \\ \left. - w \operatorname{tg} \phi \left[1 - 2 \left(\frac{K}{il} \right)^2 \left(1 - e^{\frac{-il}{K}} - \frac{il}{K} e^{\frac{-il}{K}} \right) \right] \right) \quad (17)$$

Representado na **figura 3**, o ISU-152 era um carro caçador soviético empregado na 2ª Guerra Mundial, com a função de destruir outros carros, e seu canhão era postado bem à frente. Assim, devido a essas características, é possível aproximar sua distribuição de pressão para o perfil linear decrescente. Para o moderno obuseiro autopropulsado alemão PzH-2000, **figura 4**, tem-se o oposto, uma vez que a munição e a maior parte do peso está mais à retaguarda do carro.



Fig. 4 – Distribuição de pressão linear crescente– PzH-2000 [14].

$$\sigma = \frac{2wx}{bl} \frac{1}{l} \quad (18)$$

$$F_t = (w \operatorname{tg} \phi) \left[1 - 2 \left(\frac{K}{il} \right)^2 \left(1 - e^{\frac{-il}{K}} - \frac{il}{K} e^{\frac{-il}{K}} \right) \right] \quad (19)$$

O carro de combate alemão Panzer VI, ou Tiger I (**figura 5**), usado na 2ª Guerra Mundial, apresentava rodas de apoio defasadas, para melhorar a distribuição de pressão sobre o solo. Devido a essa particularidade e ter as massas mais concentradas para o centro de sua linha longitudinal, o perfil de pressão pode ser aproximado por uma curva senoidal com valor máximo na direção de seu centro de gravidade.



Fig. 5 – Distribuição de pressão senoidal com máxima pressão no centro – Tiger I [14].

$$\sigma = \frac{w\pi}{bl} \sin \left(\frac{\pi x}{l} \right) \quad (20)$$

$$F_t = (w \operatorname{tg} \phi) \left[1 - \frac{\left(e^{\frac{-il}{K}} + 1 \right)}{2 \left(1 + \frac{l^2}{\pi^2 K^2} \right)} \right] \quad (21)$$

Kogure [11] apresenta em seu artigo as equações que descrevem a distribuição de pressão de um carro de combate por meio da parametrização de triângulos invertidos sob as rodas de apoio, que representa

a função que transmite as cargas ao solo como se observa na **figura 6**.

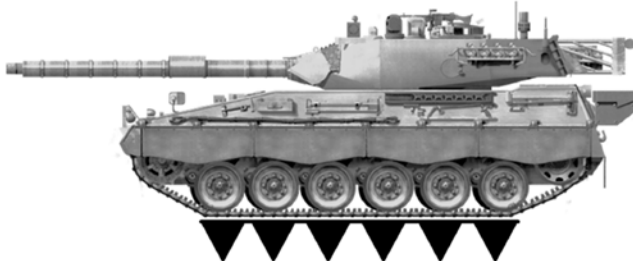


Fig. 6 – Distribuição de pressão – TAM 2C [14]

$$\sigma = \frac{P_{mm}(x - x_t + l)}{l} + \frac{P_{mm}(x - x_t - l)}{l} \quad (22)$$

Na **equação 22** P_{mm} representa a pressão máxima média, l é a distância entre rodas e x , x_t são variáveis que representam as pendentes da distribuição de pressão. Além disso, Kogure [11] explica como obter o empuxo individual de cada roda, **equação 23**. A força de tração total do veículo é o somatório das forças de empuxo desenvolvidas em cada roda de apoio, **equação 24**.

$$T_i = \tau \left(1 - \exp\left(\frac{-j}{K}\right) \right) \quad (23)$$

$$F_t = \sum_{i=0}^n T_i \quad (24)$$

Por meio da teoria desenvolvida por Bekker [5], e usando um modelo matemático da dinâmica longitudinal do veículo M113 desenvolvido em MATLAB/Simulink®, analisa-se qual das funções de distribuição de pressão apresentadas permite ao carro de combate trafegar apresentando seu melhor desempenho, e os resultados são comparados aos encontrados nas referências bibliográficas.

2. Metodologia

O modelo matemático é baseado na metodologia do fluxo de potência, desenvolvido em MATLAB/

Simulink® (**figura 7**). A força de tração transmitida ao solo pela lagarta é calculada a partir do torque fornecido pelo motor. É modelada a interação da lagarta com o solo com base em Bekker [5], permitindo identificar o esforço de cisalhamento que surge da interação supracitada. Igualando a força produzida na polia tratora, com a resposta da lagarta decorrente da interação entre o veículo e o solo, determina-se a

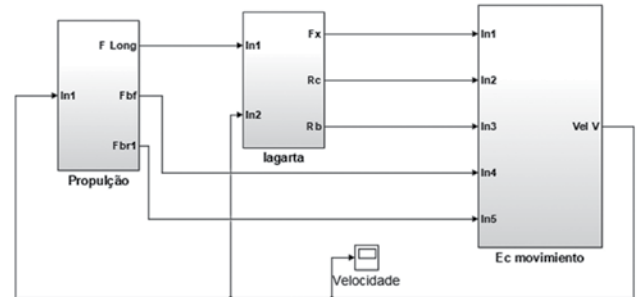


Fig. 7 – Modelo matemático em diagrama de blocos.

O torque do motor é baseado no equacionamento apresentado em [1], calculado por meio de uma função polinomial de segundo grau. Tal torque é multiplicado pelo sistema de transmissão e é fornecido à polia tratora do carro de combate. O modelo considera que a roda de tração está diretamente no contato com a lagarta e, por sua vez, apoiada no solo. Posteriormente, é considerada a equação de movimento do veículo, levando em conta a força propulsora bem como as resistências que se opõem ao deslocamento do veículo.

Nesse modelo, considera-se a resistência à compactação e a resistência de terraplanagem.

A resistência à compactação (R_c) é imposta pelo terreno às lagartas, definida pela **equação 25**. As variáveis l e b são, respectivamente, o comprimento e a largura da lagarta; W é o peso do veículo; K_c , K_ϕ , n são parâmetros característicos do solo.

$$R_c = \frac{b}{(n+1) \left(\frac{K_c}{b} + K_\phi \right)^{(1/n)}} \left(\frac{W}{bl} \right)^{(n+1/n)} \quad (25)$$

No caso da resistência de terraplanagem (R_b) é necessário interpretar o que acontece na interface

lagarta-solo. Na porção anterior da lagarta, que afunda a um valor geralmente igual ao afundamento inicial (z_0) do carro, forma-se uma barreira de solo α à sua frente, que impõe resistência ao deslocamento do carro [5], **equação 26**,

$$R_b = \left(\frac{b \sin(\alpha + \phi)}{2 \sin \alpha \cos \phi} \right) [2zcK_c + \gamma z^2 K_\gamma] \quad (26)$$

sendo z o afundamento, γ a densidade do solo, K_c e K_γ são parâmetros adimensionais do atrito interno do solo, e α a inclinação do carro de combate, que resulta do afundamento causado pelo deslocamento da lagarta. A **equação 26** é válida para ângulos de inclinação de até 6° .

O arrasto aerodinâmico é representado na **equação 27**:

$$R_{ae} = \frac{1}{2} \rho C_D A_f V_v^2 \quad (27)$$

sendo ρ a densidade do ar, C_D o coeficiente de arrasto aerodinâmico, determinado experimentalmente, A_f a área frontal do veículo, e V_v a velocidade longitudinal.

A resistência à rampa não é considerada nessa situação, dado que as simulações são todas desenvolvidas em terreno horizontal; sua equação é apresentada como:

$$R_{ramp} = W \sin \alpha_t \quad (28)$$

sendo α_t o ângulo de inclinação da superfície onde o carro se desloca e W o peso.

Na simulação é usado o veículo VBTP M113A2, equipado com o motor DETROIT DIESEL 6V 53T e com a caixa de transmissão ALLISON – MODELO TX 100-1 (**tabela 2**).

Tab. 2 – Parâmetros do veículo

VBTP M113A2	
Motor	Em V, 6 cilindros, 2 tempos, diesel
Potência Máxima	157 kW (210 hp) a 2.200 rpm
Torque Máximo	724 Nm a 1.600 rpm
Peso	11.300 kgf
Relação 1ª marcha	3,81:1
Relação 2ª marcha	1,93:1
Relação 3ª marcha	1,00:1
Relação do planetário	4,412:1
Velocidade máxima	64 km/h

Fonte: [13]

As simulações consideram o veículo trafegando sobre os solos deformáveis elencados na **tabela 1**, e as forças de tração calculadas baseando-se nos perfis de distribuição de pressão apresentados nas **equações 12 a 28**.

O veículo se desloca em linha reta, acelerando até atingir a velocidade máxima. Em cada uma das situações são considerados dois valores de deslizamento ($i = 20\%$ e $i = 80\%$).

Observa-se particularmente as respostas de velocidade final do veículo (V_F), de força de tração (F_t), e o *Drawbar Pull* (DP), definido segundo a **equação 29**.

$$DP = F_t - R_{ae} - R_{solo} \quad (29)$$

sendo R_{solo} a resistência total produzida pela interação lagarta/solo [3].

São considerados dois parâmetros: o coeficiente de DP (**equação 30**), que representa a relação em que o peso do veículo é usado para produzir tração de Drawbar Pull [9]; o coeficiente de eficiência de tração, **equação 31**, que representa a produtividade potencial do veículo, ou seja, a velocidade com que o trabalho produtivo pode ser realizado [9], sendo então os parâmetros de comparação entre os resultados obtidos.

$$Coef DP = \frac{DP}{W} \quad (30)$$

$$Coef Pw = DP V_F \quad (31)$$

Com a finalidade de avaliar adequadamente a influência da distribuição de pressão na obtenção de força de tração, em todas as simulações foi considerado o mesmo afundamento inicial.

3. Resultados

3.1 Ensaios A

Os Ensaios A compreendem 4 simulações, e o objetivo é avaliar o comportamento da

distribuição de pressão em solo argiloso. As simulações são realizadas com valores diferentes de deslizamentos. Em todas as simulações, os valores de afundamento (Z_o), resistência à compactação (R_c) e resistência de terraplanagem (R_b) são sempre os mesmos (**tabela 3**).

Tab. 3 – Parâmetros característicos dos solos.

Solo	Z_o (m)	R_c (kN)	R_b (kN)
Argila pesada (HC)	0,003	0,111	0,055
Argila úmida (CL)	0,064	0,369	5,131

Nas duas primeiras simulações (A-1 e A-2) é considerando o deslizamento $i = 80\%$ em cada tipo de solo, e na terceira e quarta (A-3 e A-4), $i = 20\%$ (**tabela 4**).

Tab. 4 – Simulações Ensaio A

Simulação	Solo	c (kPa)	ϕ (°)	i (%)
A-1	Argila pesada (HC)	20,69	6°	80
A-2	Argila úmida (CL)	3,45	11°	80
A-3	Argila pesada (HC)	20,69	6°	20
A-4	Argila úmida (CL)	3,45	11°	20

As respostas das simulações são apresentadas na **tabelas 4.1 a 4.4**.

Tab. 4.1 – Resultados da simulação A-1

Nº	Perfil Dist. Pressão	F_t (kN)	V_F (km/h)	V_{50seg} (km/h)	Coef DP	DP Power
(1)	Linear crescente	32,77	62,64	62,43	0,4737	935,3
(2)	Senoidal c/ máx. no mio	32,77	62,64	62,43	0,4737	935,3
(3)	Uniforme	32,67	62,64	62,43	0,4720	932,3
(4)	Linear decrescente	32,65	62,61	62,43	0,4718	931,6
(5)	Senoidal	32,57	62,59	62,38	0,4708	928,3
(1)	Kogure	32,86	62,67	62,42	0,4747	938,3

Tab. 4.2 – Resultados da simulação A-2

Nº	Perfil Dist. Pressão	F_t (kN)	V_F (km/h)	V_{50seg} (km/h)	Coef DP	DP Power
(1)	Linear crescente	18,13	24,15	21,74	0,1987	151,4
(2)	Senoidal c/ máx. central	18,12	24,15	21,71	0,1986	151,3
(3)	Uniforme	17,91	23,93	21,45	0,1957	147,7
(4)	Linear decrescente	17,74	23,75	21,21	0,1935	144,9
(5)	Senoidal	17,68	23,69	21,14	0,1927	144,0
(3)	Kogure	17,94	23,97	21,49	0,1963	148,3

Tab. 4.3 – Resultados da simulação A-3

Nº	Perfil Dist. Pressão	F_t (kN)	V_F (km/h)	V_{20seg} (km/h)	Coef DP	DP Power
(1)	Linear crescente	32,77	62,64	62,43	0,4734	935,2
(2)	Senoidal c/ máx. no mio	32,76	62,64	62,43	0,4734	935,2
(3)	Uniforme	32,37	62,54	62,32	0,4681	923,2
(4)	Linear decrescente	32,28	62,52	62,29	0,4670	920,6
(5)	Senoidal	32,97	62,43	62,43	0,4628	911,2
(6)	Kogure	31,00	62,17	61,90	0,4499	882,1

Tab. 4.4 – Resultados da simulação A-4

Nº	Perfil Dist. Pressão	F_t (kN)	V_F (km/h)	V_{20seg} (km/h)	Coef DP	DP Power
(1)	Linear crescente	18,06	24,09	21,65	0,1979	150,4
(2)	Senoidal c/ máx. no mio	18,00	24,00	21,52	0,1967	148,8
(3)	Uniforme	17,22	23,18	20,42	0,1866	136,4
(4)	Linear decrescente	16,58	22,39	19,22	0,1782	125,9
(5)	Senoidal	16,35	22,09	18,58	0,1754	122,2
(4)	Kogure	16,69	22,53	19,50	0,1796	127,7

É escolhida a simulação A-4 para apresentar a resposta do veículo de cada uma das distribuições de pressão, porque nela melhor se observam as diferenças de desempenho (**figura 8**), enquanto nas demais não se consegue evidenciá-las.

As respostas em velocidade de cada uma das distintas distribuições de pressão mantiveram sempre a mesma relação de ordenamento relativo considerando seu desempenho geral. Pode-se observar que aquela distribuição de pressão, que tem o melhor desempenho no solo argiloso pesado (HC), também tem o melhor desempenho no solo argiloso úmido (CL) segundo as **tabelas 4.1 a 4.4**.

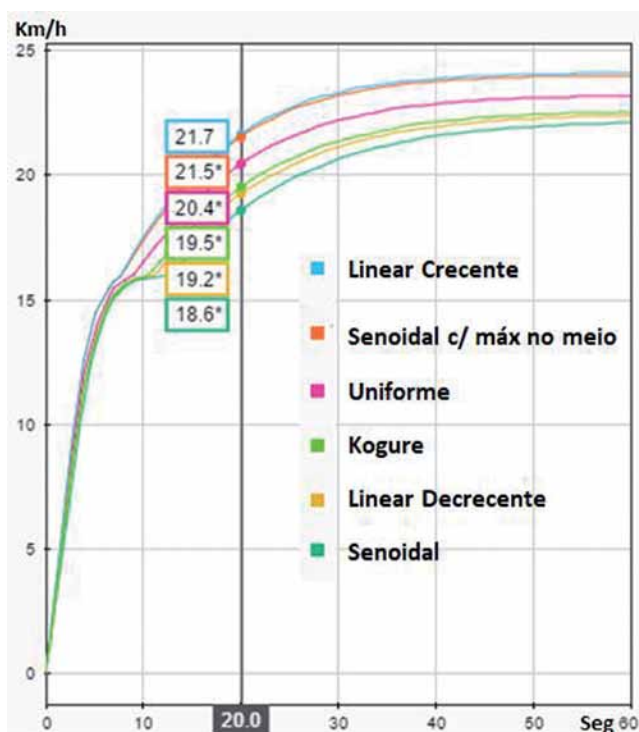


Fig. 8 – Velocidade: desempenho de acordo com cada perfil de distribuição de pressão na simulação A-4.

Observa-se que o perfil de distribuição de pressão linear crescente, é o que apresenta o melhor desempenho em todas as simulações, ainda que variando o deslizamento. Os resultados obtidos para cada perfil de distribuição de pressão podem ser ordenados na seguinte sequência:

- linear crescente;
- senoidal com máximo central;
- uniforme;
- linear decrescente;
- senoidal.

O caso do perfil de distribuição de Kogure apresenta resultados de acordo com as distribuições previstas em [9], mas sofre pequenas variações relativas em cada tipo de solo. Ainda, ao modificar o valor do deslizamento não mantém a mesma relação no ordenamento geral dos desempenhos em velocidade das distribuições apresentadas. Pode-se observar que no caso do solo argiloso pesado (HC), com 80% de deslizamento, tem o melhor desempenho (**tabela 4.1**),

mas quando o deslizamento é 20%, está em sexto lugar no ordenamento (**tabela 4.3**). No caso do solo tipo argila úmida (CL), com 80% de deslizamento, ocupa a terceira posição (**tabela 4.2**) e com deslizamento de 20% cai para quarta posição (**tabela 4.4**). Portanto, o modelo de Kogure é mais sensível ao deslizamento do que o modelo de Bekker.

3.2 Ensaios B

Nos ensaios B verifica-se a influência do valor do coeficiente de coesão no desempenho do carro de combate considerando a distribuição de pressão uniforme. Neste caso são realizadas quatro simulações considerando os solos selecionados e variando o valor do coeficiente de coesão em cada solo, e quer-se observar a influência do valor do coeficiente de coesão no desempenho do veículo. Na **tabela 5** são apresentadas as características de cada simulação.

Tab. 5 – Solo e deslizamento, Ensaios B.

Simulação	Solo	c (kPa)	Φ (°)	i %
B-1	Argila pesada (HC)	20,69	6°	80
B-2	Argila pesada (HC)	0	6°	80
B-3	Argila úmida (CL)	3,45	11°	80
B-4	Argila úmida (CL)	0	11°	80

Nas **tabelas 5.1 e 5.2**, pode-se observar a velocidade do veículo, a força de tração (F_t) e o valor da resistência de terraplanagem (R_b), após trafegar 20 segundos, assim como os parâmetros de rendimento, o Coeficiente de DP e DP Power.

Tab. 5.1 – Argila Pesada (HC)

Nº	Perfil	F_t (kN)	V_{20seg} (km/h)	R_b (kN)	Coef DP	DP Power
B-1	Unif.	32,67	53,5	0,055	0,4720	932,3
B-2	Unif.	7,42	25,7	0,001	0,1038	110,1

Nas simulações B-1 e B-2 com solo do tipo argila pesada (HC), tem-se que:

- No caso da determinação da Força de tração e considerando que o coeficiente de coesão influencia o valor da força, vê-se que quando o

valor do coeficiente é 20,69 kPa, a força atinge um valor de 32,67 kN. Logo depois, na simulação, é considerado $c = 0$, portanto a F_t diminui, na ordem de 77%, atingindo 7,42 kN.

- b. Na simulação inicial, o valor de Resistência de terraplanagem é 0,055 kN. Isso ocorre pelo fato de ter um afundamento pequeno (0,003m) e ter um valor grande de coeficiente de coesão. Mas para $c = 0$, a R_c muda para um valor de 0,001 kN. É preciso lembrar que os dois parâmetros participam no equacionamento para determinar a R_b (ver **equação 24**).

O afundamento tem uma influência maior no equacionamento, mas por causa de seu grande neste tipo de solo, o valor de R_b (0,055 kN) na simulação B-1 não é significativo.

Na análise da velocidade, quando o valor do coeficiente de coesão é 20,69 kPa, o carro de combate alcança uma velocidade de 53,5 km/h em 20 s. Na simulação para $c = 0$, o veículo alcança uma velocidade de apenas 25,7 km/h em 20 s.

Analisando os parâmetros de rendimento, o Coeficiente DP diminui 78%, de 0,4220 a 0,1038. No caso de DP Power o valor também diminui, na ordem de 88%, de 932,3 a 110,1 (**tabela 4.1**).

A resposta em velocidade da simulação do solo de argila pesada (HC) com valores de coeficiente de coesão $c = 20,69$ e $c = 0$ são apresentados na **figura 9**.

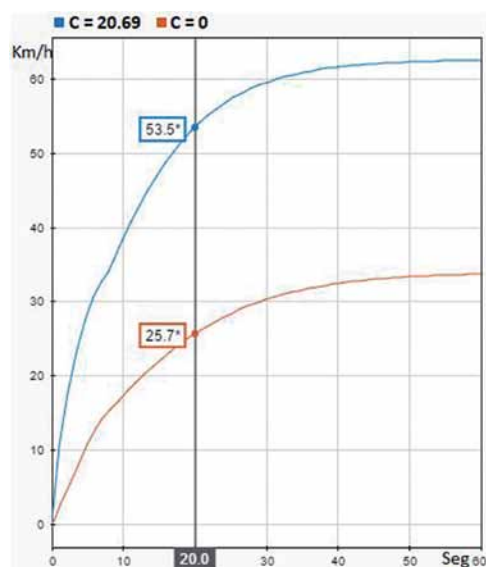


Fig. 9 – Valores de velocidade em solo de argila pesada (HC) para dois diferentes valores de coesão (ensaios B-1 e B-2).

Por outro lado, nos ensaios B-3 e B-4 com solo argiloso úmido (CL), observa-se os seguintes detalhes da **tabela 5.2**:

Tab. 5.2 – Argila úmida (CL)

Nº	Distribuição Pressão	F_t (kN)	V_{20seg} (km/h)	R_b (kN)	Coef DP	DP Power
B-3	Uniforme	17,91	21,4	5,131	0,1957	147
B-4	Uniforme	13,69	30,3	0,002	0,1801	187

No caso da determinação da força de tração e considerando o coeficiente de coesão de 3,45 kPa ela atinge o valor de 17,91 kN. Quando é considerado $c = 0$, a F_t diminui na ordem de 23%, obtendo o valor de 13,69 kN.

Observando a resistência de terraplanagem, o valor inicial é 5,131 kN. Isso ocorre pelo fato de haver afundamento (0,064 m) e um valor de coeficiente de coesão de $c = 3,45$ kPa. Mas logo ao empregar $c = 0$, muda para um valor de 0,002 kN.

Nas análises de valores de velocidade, quando o valor do coeficiente de coesão é 3,45 kPa, o carro de combate alcança uma velocidade de 21,4 km/h em 20 s. Na simulação sobre o mesmo solo, para $c = 0$, o veículo alcança uma velocidade maior, de 30,3 km/h em 20 s. Isso se deve a uma pequena variação na F_t e principalmente pela grande redução do R_b no caso de $c = 0$.

É importante ressaltar que neste caso particular, a variação na F_t não é grande (decrece 23%). Além disso, o valor de R_b sofre uma grande mudança, de 5,131 kN para 0,002 kN. Portanto o rendimento geral é bem melhor, permitindo ao veículo alcançar maior velocidade (**figura 10**).

Analisando os parâmetros de rendimento, o Coeficiente DP diminui 8%, passando de 0,1957 a 0,1801. Mas no caso de DP Power, aumenta cerca de 27%, de 147,7 para 187,8.

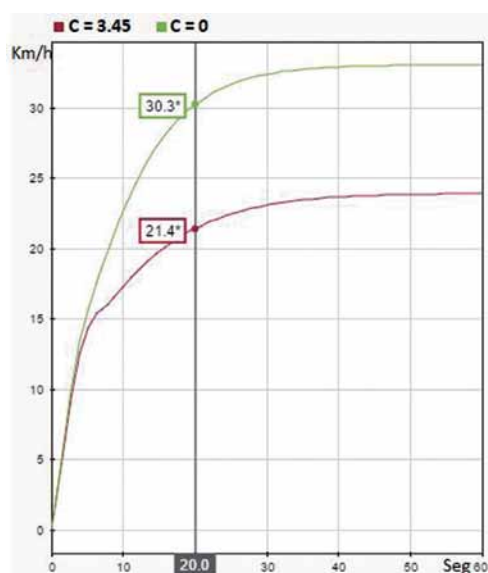


Fig. 10 – Valores de velocidade em solo de argila (CL) para dois diferentes valores de coesão (B-3 e B-4).

4. Discussões

Das simulações realizadas é possível observar que, ao mudar o perfil de distribuição de pressão, a força de tração é influenciada, sendo também influenciada a resposta do veículo (simulações A).

Aquelas distribuições de pressão que têm um valor absoluto menor na parte inicial da lagarta desenvolvem forças de tração mais altas (simulações A).

Comprova-se, ao comparar os dois perfis de distribuições lineares (figuras 3 e 4), que quando a distribuição de pressão tem menor valor absoluto na parte dianteira do veículo, a força de tração, o *Drawbar Pull* e o desempenho do carro de combate são bem melhores (ver tabelas 4.1 a 5.2).

Embora na simulação do deslizamento de $i = 20\%$ e $i = 80\%$, não seja observada grande diferença nos valores absolutos da força de tração, as relações entre um tipo de perfil de distribuição de pressão e outro permanecem as mesmas, exceto para a simulação de Kogure.

Em solos macios que proporcionam maior afundamento, a resistência de terraplanagem (R_b) tem grande influência sobre o rendimento geral do veículo, principalmente se o solo é do tipo coesivo.

5. Conclusões

Considerando que diferentes perfis de distribuição de pressão foram considerados para o mesmo veículo (M113), e os parâmetros dos solos foram os mesmos no momento das simulações para todos os perfis de distribuição de pressão, no ensaio A e no ensaio B, somente foi modificado o valor c , observa-se que os resultados são coincidentes com os de Wong [9]. Além disso, as diferentes distribuições mantêm sempre a mesma relação entre elas em todas as simulações.

O modelo de distribuição de pressão apresentado por Kogure e modelado neste trabalho tem resposta geral similares à apresentadas por Wong [9]. Só que este modelo não mantém a mesma relação com as outras distribuições apresentadas.

Quando o solo é bem macio, o afundamento é maior, e assim a resistência de terraplanagem tem grande influência no rendimento geral do carro de combate, uma vez que tanto o afundamento como o coeficiente de coesão participam na determinação de seu valor. O modelo de simulação é bem representativo da realidade, e permite verificar o desempenho de cada tipo de veículo com o perfil de distribuição de pressão adequado.

Referências Bibliográficas

- [1] Jazar, R. N. Vehicle Dynamics, – Theory and application, Springer, 2008.
- [2] Rill, G. Road Vehicle Dynamic, Fundamentals and Modeling, Taylor and Francis Group, 2011.
- [3] Gillespie, T. Fundamentals of Vehicle Dynamics, SAE Inc, 1992.
- [4] Wong, J. Theory of ground vehicles, 3rd Edition, John Wiley & Sons Inc, Nova Jersey, 2001.
- [5] Bekker, M. G. Theory of Land Locomotion, University of Michigan, Michigan, 1956.
- [6] Bekker, M.G. Introduction to Terrain-Vehicles Systems, University of Michigan, Michigan, 1969.
- [7] Garber, M. Wong,Y. Prediction of ground pressure distribution under tracked vehicles - I. J, Terramechanics, 1981,18:1, p. 01-23
- [8] Janarthanan, B. Chandramouli, P. Sujath, C: Longitudinal dynamics of a tracked vehicles: Simulation and experiment. J Terramechanics, 2012, 49, p. 63-72.
- [9] Wong, J. Terramechanics and off-road vehicles engineering, 2nd Edition, Elsevier Ltd, 2010.
- [10] Laughery, S. Gerhart, G. Goetz, R: Bekker`s Terramechanics Model for Off-road Vehicle Research. US Army TARDEC Warrem, MI 48397-5000.
- [11] Kogure, K. Sugiyama,N A study of soil thrust exerted by a tracked vehicle. J, Terramechanics, 1975, 12:3/4, p. 225-238.
- [12] Dwyer, M. Okello, J. Scarlett, A, A theoretical and experimental investigation of rubber tracks for agriculture. J, Terramechanics, 1993, 30:4, p. 285-298.
- [13] TM 9-2350-261-10. Technical manual. Operator's manual for carrier, personnel, full tracked, armored, M113A2, Headquarters, Departament of the Army, 2005.
- [14] <https://tanks-encyclopedia.com>

Prospecção tecnológica utilizando análise de patentes e o método AHP: estudo de caso dos materiais de carbono para o setor de defesa

Fernanda Castello Branco Madeu*, Paulo César Pellanda, Aderson Campos Passos

^a Instituto Militar de Engenharia (IME)

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

*fernanda7407@gmail.com

RESUMO: Este trabalho apresenta um novo método quantitativo de prospecção tecnológica para apoio à tomada de decisão na área de Ciência, Tecnologia e Inovação (CTI). O objetivo principal é priorizar tecnologias de uma determinada área com base em um método multicritério conhecido como Processo de Análise Hierárquica (AHP). A ideia é utilizar um novo conjunto de critérios que consideram parâmetros quantitativos relacionados ao número de registros de patentes e a uma medida do alinhamento entre as tecnologias e os objetivos estratégicos da organização que deseja priorizá-las. O resultado é uma listagem das potenciais tecnologias ordenadas segundo índices calculados a partir da ponderação das pontuações parciais obtidas para cada critério de mensuração, indicando aquelas mais promissoras considerando-se a sua difusão e o seu alinhamento com a organização. O método proposto é aplicado a um estudo de caso de tecnologias na área de materiais de carbono para o Exército Brasileiro.

ABSTRACT: This paper presents a new quantitative prospective method for decision support in the field of Science, Technology and Innovation (STI). The main objective is to define a priority order for technologies in a specific field based on a multicriteria method known as Analytic Hierarchy Process (AHP). The idea is to use a new set of criteria that consider quantitative parameters related to the number of patent registers and to a measure of the alignment between the technologies and the strategic goals of the organization seeking their prioritization. The final result is a listing of potential technologies ordered according to indexes computed from weighting the partial scores obtained for each measurement criteria. It indicates the most promising technologies considering their diffusion and alignment with the organization. The proposed method is applied in a case study for the Brazilian Army in the field of carbon materials.

PALAVRAS-CHAVE: Prospecção tecnológica. Multicritério. AHP. Patentes.

KEYWORDS: Technology foresight. Multicriteria. AHP. Patents.

1. Introdução

O desenvolvimento de produto/serviço de alto valor tecnológico agregado depende de equipe capacitada, recursos financeiros, laboratórios e demoram bastante tempo até a entrega do produto ou serviço para o cliente final. Devido a essa demora, é fundamental compreender as necessidades do mercado e os desafios futuros através da prospecção, de maneira que o produto/serviço não esteja obsoleto no momento do seu lançamento. No caso específico dos produtos de defesa (PRODE), devem ser consideradas as possíveis ameaças e seus impactos nos requisitos desses produtos e o quanto eles irão contribuir para as capacidades requeridas

pela organização que os produz [1].

As organizações envolvidas com o desenvolvimento desses produtos devem se planejar estrategicamente e tomar decisões acertadas a respeito das tecnologias que irão priorizar, considerando: o impacto que essas tecnologias terão no contexto dissuasório nacional, a capacidade que a indústria nacional terá para trabalhar com as tecnologias selecionadas, a possibilidade de utilizar essas tecnologias em produtos civis e as limitações de recursos para o seu desenvolvimento, dentre outros aspectos [2][3][4][5].

Nessa esteira, a análise prospectiva associada à análise de decisão no campo da Ciência, Tecnologia e Inovação (CT&I) se torna uma ferramenta para tentar

antecipar o desenvolvimento científico e tecnológico, de forma a guiar e orientar o rumo da CT&I de acordo com o planejamento estratégico de uma determinada organização [6].

É importante considerar que o exercício de prospecção está diretamente ligado à tomada de decisão estratégica. Existem várias técnicas para auxiliar a tomada de decisão em nível estratégico. Em geral, problemas nesse nível envolvem riscos altos, julgamentos humanos, e suas soluções geram repercussões à longo prazo, requerendo que sejam práticas e minimamente dispendiosas em termos de tempo e recursos. Dessa forma, torna-se interessante mesclar técnicas de prospecção tecnológica e de análise decisória a fim de se obter resultados mais robustos e confiáveis.

Tanto para diminuir as incertezas de resultados, como também pelo fato de informações referentes a CT&I serem provenientes das mais diversas fontes de dados, tornando assim sua coleta, processamento e análise mais complexa, vê-se necessário utilizar métodos variados e adaptá-los de acordo com os objetivos da instituição, a fim de obter os subsídios para decidir prioridades na área de CT&I [1]. O método proposto neste trabalho é voltado para instituições ancoradas no tripé CT&I e envolve conjuntamente o método multicritério de tomada de decisão *Analytic Hierarchy Process* (AHP) e o método de prospecção baseado em análise de patentes.

O método aqui proposto visa analisar tecnologias diversas de uma mesma área do conhecimento, no intuito de realizar uma comparação abrangente entre elas, para auxiliar na tomada de decisão no que diz respeito à seleção de tecnologias para investimento em PD na área em questão. Para ilustrar sua eficiência ele é aplicado a um estudo de caso da área de materiais de carbono.

A principal contribuição deste estudo é a utilização conjunta de um método de análise multicritério com outro método de prospecção, congregando quatro indicadores para a análise de patentes e considerando também a importância das capacidades da organização, que pode ser adaptada conforme os decisores acharem necessário. A abrangência deste

trabalho também se diferencia no contexto da literatura de prospecção tecnológica, pois engloba um número considerável de tecnologias de uma determinada área (materiais de carbono). Não somente esse número pode ser expandido como também mais de uma área tecnológica pode ser comparada. A maioria dos estudos encontrados na literatura avalia o escopo de somente uma tecnologia ou de um pequeno grupo de até três tecnologias para fins comparativos, utilizando apenas alguns dos critérios aqui selecionados ou então avaliando-os separadamente.

Este artigo está estruturado da seguinte forma: nas duas próximas seções, são apresentados os principais aspectos relacionados com os dois métodos propostos para serem conjuntamente utilizados; na seção seguinte, o método proposto é apresentado; a sexta seção apresenta o estudo de caso; os resultados e conclusões são apresentados na última seção.

2. Análise de Decisão Multicritério

Tomar decisões é uma das tarefas mais importantes dos líderes e gestores, mas também uma das mais difíceis e arriscadas. Decisões mal tomadas podem acabar com negócios, projetos e até carreiras de formas irreparáveis. Mas o que define uma decisão mal tomada? Na maioria das vezes, elas estão associadas a maneira como o decisor chegou até elas, ou seja, aos erros cometidos no processo decisório – as alternativas não foram bem definidas, as informações importantes não foram bem coletadas, os custos e benefícios não foram bem calculados [7].

Os métodos de análise de decisão multicritério (*Multicriteria Decision Making* – MCDM) se apresentam como uma alternativa para auxiliar e diminuir os erros cometidos no processo de tomada de decisões complexas.

As origens desses métodos estão ligadas a como um decisor pode escolher entre potenciais alternativas sob à luz de múltiplos objetivos [8]. Ao longo dos anos, os estudos sobre esses métodos têm se desenvolvido, gerando uma nova área de pesquisa com as mais diversas aplicações, desde situações de tomada de decisão operacionais até de planejamento estratégico

de alto escalão [9].

No contexto da prospecção tecnológica, o potencial dos MCDM não tem sido muito aproveitado. Isso pode ser explicado pelo fato de que exercícios de prospecção vêm se tornando cada vez mais comuns e a literatura sobre o assunto tem dado mais importância a questões organizacionais do que a questões metodológicas [8].

No entanto, tem-se observado relatos favoráveis sobre métodos de MCDM em contextos como previsão de julgamento, avaliação de projetos e gerenciamento de portfólio de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), apontando que esses métodos podem ser promissores no contexto prospectivo [8].

De fato, exemplos de aplicações bem-sucedidas de MCDM podem ser encontrados em várias áreas, como: energia [10], saúde [11] e avaliação de tecnologias (*Technology Assessment*) [12].

Existem diversos métodos de análise de decisão multicritério e que podem ser classificados de diversas formas. Uma classificação largamente aceita divide as técnicas de MCDM em duas categorias: multiatributo (*Multiattribute Decision Making* – MADA) e multiobjetivo (*Multiobjective Decision Making* – MODA). Os problemas multiatributo são discretos, ou seja, possuem um número inteiro predeterminado e limitado de alternativas (problema de seleção); já problemas multiobjetivos são contínuos, ou seja, possuem uma quantidade contínua de alternativas e a melhor solução está em uma região entre as soluções possíveis (problemas de projeção) [13]. O método adotado neste trabalho (AHP) é classificado como MADA e será explanado a seguir.

2.1 Analytic Hierarchy Process (AHP)

O Método de Análise Hierárquica ou AHP foi desenvolvido pelo pesquisador americano Thomas L. Saaty, na época em que era diretor de projetos de pesquisa na Agência de Desarmamento e Controle de Armas dos Estados Unidos, na década de 1970. Ele desenvolveu este método, baseado em sua experiência adquirida na agência, onde constatou que não havia uma metodologia consagrada, de fácil compreensão e implementação para auxiliar a tomada de decisões complexas. Desde então,

devido ao seu poder e simplicidade, o método AHP tem sido aplicado em diversas áreas no mundo todo. Ele tem sido útil nas áreas de negócios, governamental, social, Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PD&I), defesa e outras, quando decisões envolvendo escolhas, priorização ou previsão são necessárias [14].

Sua simplicidade e facilidade de utilização advém do fato de que o método permite decompor um problema complexo em uma cadeia hierárquica de subproblemas mais simples que podem ser mais facilmente resolvidos e avaliados subjetivamente. As avaliações subjetivas são convertidas em valores numéricos que, em seguida, são processados para associar uma nota a cada alternativa analisada no processo [14].

A hierarquia indica a relação entre elementos de um determinado nível e outros em um nível imediatamente abaixo, essa relação se perpetua ao longo da estrutura de forma que cada elemento esteja ligado aos outros, mesmo que de forma indireta. No topo da estrutura hierárquica do AHP encontra-se a descrição do problema decisório, no nível abaixo estão os critérios (ou atributos) considerados no processo, abaixo deles podem estar subcritérios, se for o caso, e no último nível (base da cadeia) estão as alternativas analisadas. Dessa forma, é como se o problema principal fosse dividido em problemas menores mais fáceis de serem resolvidos, as pequenas soluções são então agregadas por meio de pesos estipulados, a fim de se obter a solução final [13]. Esses pesos são calculados considerando a relação entre os critérios, a qual é baseada na Escala de Saaty, ilustrada na **tabela 1**. A **figura 1** ilustra uma estrutura hierárquica genérica do método AHP.

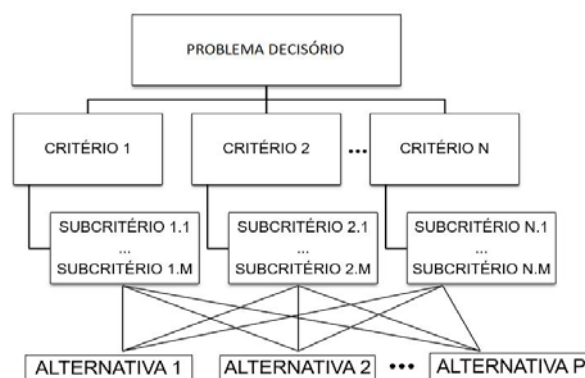


Fig. 1 – Estrutura hierárquica genérica do AHP.

Tab. 1 – Escala de Saaty para definição da importância entre critérios.

Escala de Saaty	
1	Mesma importância
2	Critério intermediário
3	Importância moderada de um sobre o outro
4	Critério intermediário
5	Importância essencial ou forte
6	Critério intermediário
7	Importância muito forte
8	Critério intermediário
9	Importância extrema

Fonte: Adaptado de [14].

3. Prospecção tecnológica

A primeira questão a ser considerada aqui é terminológica. Dada a crescente importância do tema em questão, cabe discutir sobre os diversos termos que vêm sendo utilizados na literatura e suas definições, para então estabelecer o significado adotado neste trabalho. Alguns autores, como Raul Grumbach, têm utilizado o termo prospecção com o mesmo significado de *foresight*, o que levou a associação dos dois termos no início das pesquisas sobre o tema no Brasil [6][15]. Coates [16] definiu o termo *foresight* como “um processo pelo qual pode-se chegar a um entendimento mais completo das forças que moldam o futuro a longo prazo e que devem ser levadas em consideração na formulação de políticas, planejamento e tomadas de decisão”. Ainda de acordo com Coates [16], o *foresight* inclui métodos quantitativos e qualitativos para monitorar indicadores de tendências de desenvolvimento e sua evolução; ele é particularmente útil quando está diretamente ligado a análises de políticas e seus resultados. Cabe ressaltar que o *foresight* não define políticas, mas pode torná-las mais apropriadas e flexíveis e sua implementação mais orientada aos objetivos da organização que o utiliza, mesmo em condições instáveis [17].

O termo *prospecção* também pode ser associado ao termo em inglês *forecast*. Contudo, este é conhecido por ser um estudo de futuro técnico, com caráter preditivo e probabilístico e, normalmente, exige o máximo de precisão em seus resultados. Tal

característica excluía a possibilidade de que as ações humanas e acontecimentos inesperados possam alterar as previsões de futuro, estando aí a principal diferença entre *forecast* e *foresight* [18].

Além disso, *foresight* é considerado um processo, e não somente um conjunto de ferramentas técnicas como é o caso do *forecast*. A prática do *foresight* envolve o reconhecimento explícito que os desenvolvimentos tecnológicos e científicos dependem de escolhas feitas pelos atores no presente, isto é, não estão determinados apenas por alguma lógica intrínseca, nem acontecem de maneira independente e aleatória. Dessa forma, o processo de *foresight* leva a interações sob o pano de fundo caótico de um período de mudanças, promovendo o fluxo de conhecimentos entre os diversos atores envolvidos [17].

Nesse contexto, o *foresight* pressupõe uma antecipação, pois exige uma atitude proativa que prepara a organização para o que está por vir, ao invés de considerar uma ação somente quando o futuro chega. Ele envolve claramente o reconhecimento de que as escolhas feitas hoje podem moldar o futuro, e que previsões determinísticas em áreas que sofram alta influência das esferas política e social, como a Ciência e Tecnologia (CT), não possuem muito valor [18].

Com isso, o termo *foresight* passou a ser mais utilizado ao se tratar de previsões na área de CT, futuramente evoluindo para os termos *Technology Foresight*, bem como para outros termos que foram surgindo ao redor do mundo, conforme as pesquisas no ramo foram se espalhando.

O significado do termo *prospecção* adotado neste trabalho é aquele associado ao *foresight*, já que o foco é a área de CT&I, e seu uso estará sempre associado à Prospecção Tecnológica, assim como em *Technology Foresight*. A seguir, apresenta-se a definição de Prospecção Tecnológica que serve de base para a presente pesquisa. Ela foi estruturada baseada nas definições dos termos discutidos, apoiando-se, principalmente, nos trabalhos de Coates [16], Zackiewicz [17] e Martin [18]: Prospecção Tecnológica é um processo com o objetivo de garantir que as áreas que possam trazer os maiores benefícios futuros

sejam detectadas e identificadas em seus estágios iniciais, assumindo que a CT&I possa contribuir significativamente para as esferas social, cultural e econômica. O processo gira em torno de avaliar as chances de desenvolvimento futuro e as opções de ações presentes viáveis de serem realizadas para alcançá-lo, agindo de forma proativa em relação às mudanças. Ele pode ser conduzido por meio de uma combinação de técnicas qualitativas e/ou quantitativas, levando em consideração os objetivos estratégicos da organização, bem como aspectos relacionados às condições do ambiente em que está inserida e aos atores envolvidos.

Com esse conceito principal em mente, pode-se dizer que a prospecção pode assumir algumas funções complementares. Dentre as seis apontadas por [17], encontra-se a definição de prioridade, que consiste em identificar e priorizar os desenvolvimentos mais promissores para a P&D de um país ou organização. É essa função do processo de prospecção que norteia o presente trabalho. Para realizar o processo de prospecção, existem alguns métodos disponíveis, os quais podem ser combinados e/ou adaptados de acordo com as necessidades e objetivos de cada organização que os utiliza. Os autores de [19] classificam esses métodos em três categorias: qualitativos, semi-quantitativos e quantitativos.

O método proposto nesta pesquisa se baseia no método de análise de patentes, o qual é classificado como um método quantitativo de prospecção (apesar de também permitir uma análise qualitativa dependendo do enfoque) e será discutido a seguir.

3.1 Análise de patentes

A análise de patentes utiliza esses documentos como ponto de partida, fornecendo informações estratégicas sobre tecnologias, e podendo ser usada para indicar uma vantagem competitiva baseada na liderança em desenvolvimento tecnológico. Adicionalmente, essa técnica permite identificar

quem são os líderes tecnológicos em uma determinada área (caso não haja segredo industrial¹); comparar organizações e países em relação ao seu nível de domínio de uma tecnologia; e visualizar os campos tecnológicos onde altos níveis de atividade evidenciam-se em andamento. Ela é baseada em métodos estatísticos e *data mining* para analisar quantitativamente registros de patentes, por exemplo: um aumento no número de registros em uma área específica reflete um alto potencial para desenvolvimento tecnológico. Uma análise mais qualitativa pode ser obtida focando-se no conteúdo dos documentos de patentes. Em geral, essas análises são usadas para auxiliar na tomada de decisões estratégicas sobre investimento em P&D, bem como para possíveis adaptações ou mesmo aquisições de tecnologias patenteadas [6] [21].

Segundo Campbell [22], dados provenientes da análise de patentes são fontes valiosas de informação para a previsão de mudanças tecnológicas. Além disso, esses dados podem ser usados para prospectar tecnologias emergentes.

De fato, indicadores de patentes fornecem uma ferramenta de prospecção muito útil para a tomada de decisão nos setores público e privado. Além disso, a análise de patentes pode indicar o padrão de crescimento de uma tecnologia (emergente, madura ou em declínio), bem como as atividades tecnológicas que estão em andamento. Também é possível identificar quais firmas estão prestes a entrar ou sair de um determinado campo tecnológico, o seu tempo de mercado e o tipo de base tecnológica, e as forças tecnológicas relativas de cada uma delas [22].

Uma limitação dessa técnica é que, mesmo na maioria dos países desenvolvidos (onde o processo de publicação de patentes costuma ser mais ágil) as informações sobre patentes são usualmente defasadas de dois ou mais anos, dependendo do tempo entre o depósito e sua publicação. Além disso, algumas indústrias fazem pouco uso de patentes, preferindo

¹Artifício utilizado por pessoas físicas ou jurídicas para preservar a natureza confidencial de uma informação e evitar que a mesma seja divulgada, adquirida ou usada por terceiros não autorizados, desde que tal informação seja secreta, tenha valor comercial por ser secreta, e tenha sido objeto de precauções razoáveis para mantê-la secreta pela pessoa legalmente responsável. Por informação secreta entende-se aquela que não seja conhecida em geral e nem facilmente acessível a pessoas que nor-

utilizar outras formas de proteger suas inovações e tecnologias (como o segredo industrial), o que as torna difíceis de serem rastreadas e acessadas. Contudo, isso não deve ser interpretado como baixo ou nenhum investimento em P&D na área analisada por parte dessas organizações [6] [21].

A etapa que envolve análise de patentes do método aqui proposto baseia-se no trabalho de Altuntas [23], no qual os autores estabeleceram um método baseado em dados de patentes para estabelecer o sucesso tecnológico de determinada tecnologia. Para tanto, eles utilizaram quatro critérios os quais serão discutidos a seguir: Ciclo de Vida Tecnológico (CVT), Velocidade de Difusão Tecnológica e Abrangência tecnológica – que engloba os critérios Alcance e Potencial de Expansão.

3.1.1 Ciclo de Vida Tecnológico (CVT)

A tendência de desenvolvimento de uma determinada tecnologia em termos de uma medida de desempenho ao longo do tempo (ou recursos investidos) possui um ciclo de vida que pode ser representado por uma curva-S [21][24][25]. Mais especificamente, essa tendência pode ser descrita por uma curva-S que divide o ciclo de vida tecnológico em quatro estágios: iniciação, crescimento, maturidade e saturação [21] [26], conforme mostra a **figura 2**.

O primeiro estágio – fase de iniciação – representa um baixo crescimento do desempenho tecnológico em relação aos esforços aplicados em P&D. No segundo estágio – fase de crescimento – o progresso tecnológico, marginal em relação ao tempo e recursos de P&D investidos (tangente à curva), é positivo. Em contrapartida, no terceiro estágio – fase de maturidade – o aumento marginal é negativo. Já no quarto estágio – fase de saturação – pequenos aumentos no desempenho tecnológico só são possíveis se for dispendido um grande esforço em P&D [21].

Com base no CVT ilustrado pela curva-S, podem ser tomadas decisões estratégicas envolvendo investimento de tempo e esforços em P&D. As fases de iniciação e saturação são as que apresentam o maior risco, pois possuem as menores taxas de progresso do

desempenho tecnológico. Já as fases de crescimento e maturidade são as mais recomendadas para investimento, dado que apresentam maiores taxas de crescimento do desempenho tecnológico, possuindo assim mais chance de sucesso [21][23].

Neste trabalho, assume-se que os investimentos são mais vantajosos se forem realizados na segunda e terceira fases do CVT representado pela curva-S.

Uma das limitações da medição dessa curva é que ela é medida apenas considerando a dimensão tecnológica, excluindo o aspecto econômico para a avaliação de potenciais tecnologias [27]. A integração do desempenho econômico ao conceito da curva-S pode ser alcançada através da análise de patentes, proposta neste trabalho. Ainda, a atividade patentária reflete o mais recente estado da arte do desenvolvimento de uma tecnologia e é orientada para a comercialização de tecnologias emergentes, possuindo uma relação positiva com mudanças de mercado [21][28].

Nesse sentido, informações e dados advindos da análise

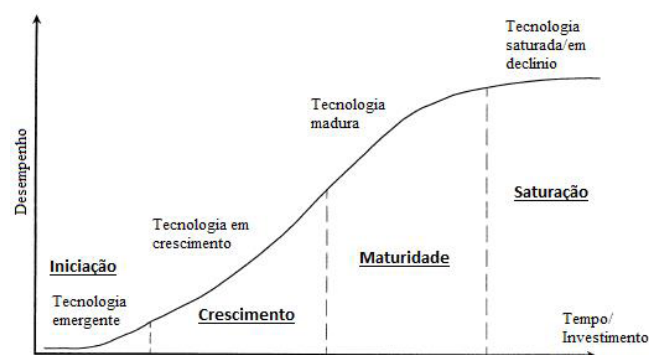


Fig. 2 – Curva-S representando o CVT. Fonte: Adaptado de [21].

de patentes podem ser fortes aliados no processo de prospecção tecnológica e, consequentemente, no auxílio à tomada de decisão [27]. Sendo assim, tem crescido a importância dos bancos de dados de patentes como fonte de informações para o planejamento estratégico de organizações. Essas informações auxiliam no planejamento de recursos para gerenciar o desenvolvimento de uma tecnologia ou produto, bem como na avaliação sistemática da posição relativa de mercado dos competidores [29].

Assim, nesta pesquisa, como primeiro critério, utiliza-se a quantidade acumulada de patentes de determinadas tecnologias para identificar em que estágio de seu ciclo de vida elas se encontram, a fim de verificar quais delas proporcionariam um investimento mais promissor.

Cabe ressaltar que o CVT pode ser utilizado como critério de duas formas: ele pode ser exclusivo – quando uma alternativa não estiver nas fases de crescimento ou maturidade ela é excluída – ou pode ser relativo – quando uma alternativa estiver nas duas fases mais promissoras ela receba uma determinada nota, e quando estiver nas outras duas fases, receba uma nota inferior. Em ambos os casos ele compara as alternativas. No estudo de Altuntas [23] ele foi adotado como critério exclusivo, neste trabalho ele será adotado como critério relativo, pois deseja-se considerar que mesmo tecnologias emergentes ou saturadas possam ser levadas em conta.

Para tecnologias nos estágios de crescimento e maturidade será atribuído o valor 1, para aquelas no estágio de iniciação, o valor 0,5 e para aquelas saturadas/em declínio, o valor 0,1.

3.1.2 Velocidade de Difusão Tecnológica

A difusão tecnológica é um processo pelo qual uma inovação se espalha por meios específicos dentro de um sistema social [30]. Um dos meios mais significativos se dá através do processo de citação de patentes [31].

Em um documento de patente, o inventor precisa descrever as técnicas anteriores relacionadas à invenção, as quais são geralmente apresentadas citando patentes e/ou literatura científica previamente publicadas. Quanto mais uma determinada patente é citada por outras subsequentes, mais a tecnologia relacionada pode ser considerada difundida, *i.e.*, ela é mais amplamente aplicada e, portanto, mais valiosa [32].

O processo de citação de patentes pode levar a inovações baseadas nas tecnologias existentes, bem como disseminar novas tecnologias de um campo tecnológico para outro relacionado – contribuindo

para o crescimento de determinada área – ou um completamente diferente – difundindo sua aplicação pelas mais diversas indústrias e países. Além disso, pelas relações de citação de patentes pode-se traçar o processo de difusão tecnológica e de disseminação do conhecimento através de países e organizações, o que não pode ser feito apenas com a simples estatística do quantitativo de patentes ao longo do tempo. Por isso, pesquisadores têm utilizado cada vez mais dados de citações de patentes para análise de tecnologias promissoras [31].

Considerando o conceito de difusão tecnológica previamente exposto, pode-se inferir que investir em uma tecnologia com um alto potencial de difusão deve apresentar um menor risco e um maior retorno. Sendo assim, utiliza-se nesta pesquisa, como segundo critério, a velocidade de difusão tecnológica definida por Altuntas [23]: o número médio de citação por patente, ou seja, velocidade de difusão = c/n , onde c é o número total de vezes que uma patente foi citada e n é o número total de patentes consideradas para a difusão.

3.1.3 Abrangência Tecnológica – Alcance e Potencial de Expansão

A abrangência tecnológica diz respeito ao escopo alcançado por uma tecnologia. Ou seja, quanto maior a abrangência de uma determinada tecnologia, maior é o número de tecnologias diferentes às quais ela está associada [23].

A abrangência pode ser medida por meio de dois indicadores, definidos por Altuntas [23], aqui denominados de alcance e potencial de expansão de determinada tecnologia.

O alcance tecnológico é medido através da classificação das patentes associadas àquela tecnologia. O sistema de Classificação Internacional de Patentes (IPC), estabelecido pelo Acordo de Estrasburgo de 1971, é o mais amplamente utilizado sistema de classificação hierárquica de patentes baseado nas diferentes áreas tecnológicas às quais pertencem. Ele utiliza um símbolo independente de linguagem para a classificação, adotado para diferentes graus por cada país ou organização que possua um escritório oficial

de patentes. Em geral, assim como neste trabalho, ao usar os códigos IPC como indicadores, utilizam-se os primeiros quatro dígitos do código [23] [33].

Quanto mais códigos IPC associados a uma tecnologia, maior o seu alcance. Uma tecnologia com um alto alcance, possui um maior poder de atingir diferentes setores, possuindo assim, um maior potencial de criar setores novos, logo é mais promissora. O alcance A de uma determinada tecnologia pode ser definido pela **equação 1** [23]:

$$A = x/y, \quad (1)$$

onde x é o número total de códigos IPC associados às patentes coletadas e y é o número total de patentes coletadas.

O potencial de expansão é definido como o número total de códigos IPC diferentes de um banco de dados de patentes relacionados com a tecnologia de interesse. Assim, um maior potencial de expansão implica em uma maior possibilidade de uso dessa tecnologia em outras novas abarcadas por esses códigos IPC. Ainda, o potencial de expansão indica o número de tecnologias diferentes relacionadas com a tecnologia analisada, assim, o desenvolvimento de determinada tecnologia pode contribuir para o desenvolvimento de outras novas tecnologias associadas a ela.

Em resumo, quanto maior o alcance e o potencial de expansão de uma determinada tecnologia, maior a sua abrangência tecnológica e mais promissora é essa tecnologia, oferecendo um menor risco de investimento e maior potencial de futuro.

4. Capacidade tecnológica de uma organização

Segundo Figueiredo [34], uma capacidade tecnológica de uma organização engloba quatro componentes: i) sistemas técnicos-físicos (capital físico: equipamentos, bancos de dados, *softwares*, etc.); ii) sistemas organizacionais, gerenciais e institucionais (capital organizacional: rotinas, procedimentos, normas, crenças, valores);

iii) pessoas (capital humano: conhecimento tácito, experiências, qualificações, talentos); iv) produtos e serviços. Assim, a capacidade de uma organização para criar, adaptar, gerir e gerar esses componentes, bem como a interação entre eles, é chamada de capacidade tecnológica [34].

Contudo, existe um grau de prioridade entre esses componentes, especialmente em casos de países em desenvolvimento, como é o caso do Brasil. Para as organizações desses países, o capital humano e o capital organizacional possuem uma importância maior, visto que sistemas técnico-físicos e produtos e serviços podem ser inicialmente importados, o que não acontece com rotinas, valores, crenças, experiência e conhecimento tácito dos recursos humanos [34].

Como principal premissa deste trabalho, supõe-se que a instituição que aplica o método proposto tem sua visão de futuro bem estabelecida e possui forte coerência entre esta e as prioridades de capacidades tecnológicas a serem adquiridas, aperfeiçoadas ou potencializadas. Essas capacidades podem ser estabelecidas de diversas formas, dependendo dos decisores do alto escalão da organização.

Como exemplo, no caso do Exército Brasileiro (EB), o estabelecimento das capacidades tecnológicas está intrinsicamente ligado às Capacidades Militares Terrestres (CMT) que se desdobram nas Capacidades Operativas (CO). Essa relação torna-se mais clara ao se constatar que as CMT são, em grande parte, suportadas por Materiais de Emprego Militar (MEM), e estes, quando considerados de grande importância estratégica, são obtidos por PD&I cujas tecnologias envolvidas podem ser determinadas via prospecção tecnológica.

Segundo versão mais recente do Catálogo de Capacidades do Exército, uma CMT: “é constituída por um grupo de capacidades operativas com ligações funcionais, reunidas para que os seus desenvolvimentos potencializem as aptidões de uma força para cumprir determinada tarefa dentro de uma missão estabelecida”. E uma CO: “é a aptidão requerida a uma força ou organização militar, para

Tab. 2 – Lista de capacidades

CMT	CO
PRONTA RESPOSTA ESTRATÉGICA	Mobilidade Estratégica
	Suporte à Projecção de Força
	Prontidão
SUPERIORIDADE NO ENFRENTAMENTO	Combate Individual
	Operações Especiais
	Ação Terrestre
	Manobra Tática
	Apoio de Fogo
	Mobilidade e Contramobilidade
APOIO A ÓRGÃOS GOVERNAMENTAIS	Proteção Integrada
	Atribuições subsidiárias
	Emprego em apoio à política externa em tempo de paz
	Ações sob a égide de organismos internacionais
COMANDO E CONTROLE	Planejamento e Condução
	Sistemas de Comunicações
	Consciência Situacional
	Gestão do Conhecimento e das Informações
	Digitalização do Espaço de Batalha
	Modelagem, Simulação e Prevenção
SUSTENTAÇÃO LOGÍSTICA	Apoio Logístico para Forças Desdobradas
	Infraestrutura da Área de Operações
	Gestão e Coordenação logística
	Saúde nas Operações
	Gestão de Recursos Financeiros
INTEROPERABILIDADE	Interoperabilidade conjunta
	Interoperabilidade combinada
	Interoperabilidade interagência
PROTEÇÃO	Proteção ao Pessoal
	Proteção Física
	Segurança das informações e Comunicações
SUPERIORIDADE DE INFORMAÇÕES	Guerra Eletrônica
	Operações de Apoio à Informação
	Comunicação Social
	Inteligência
CIBERNÉTICA	Exploração Cibernética
	Proteção Cibernética
	Ataque Cibernético

Fonte: Adaptado de [35].

que possam obter um efeito estratégico, operacional ou tático. É obtida a partir de um conjunto de sete fatores determinantes, inter-relacionados e indissociáveis: Doutrina, Organização (e/ou processos), Adestramento, Material, Educação, Pessoal e Infraestrutura – que formam o acrônimo DOAMEPI” [35].

Tanto as CMT, quanto as CO, são determinadas pelo Estado Maior do Exército (EME), e são resultado de métodos de análise de cenários futuros e de estudos estratégicos, que estão fora do escopo deste trabalho. Em [35], são estipuladas nove CMT e um total de 38 CO, bem como fornecidas as suas definições. A **tabela 2** apresenta a lista de CMT e CO associadas.

5. Metodologia

O método aqui proposto ordena tecnologias a fim de auxiliar na tomada de decisão para a priorização das mesmas quanto a investimento na área de CT&I. Ele utiliza técnicas de prospecção aliadas a um método multicritério para computar o sucesso tecnológico e sistematicamente apontar e priorizar áreas tecnológicas promissoras.

Inicialmente, selecionam-se as tecnologias a serem analisadas dentro da área de interesse, as quais podem ser definidas por meio de reunião com especialistas, *brainstorming*, ou simplesmente pelo decisor ou equipe de decisão. Em seguida, definem-se os critérios que serão utilizados na análise. No caso em questão, foram definidos cinco critérios: interação com as capacidades a serem desenvolvidas/aprimoradas pela organização. Para o EB, levaram-se em consideração as CMT e as CO; o potencial de desenvolvimento de cada tecnologia, que diz respeito ao estágio em que ela se encontra no seu ciclo de vida tecnológico, baseado na curva-S de patentes; a velocidade tecnológica de difusão, a qual considera o número total de citações das patentes daquela tecnologia; o alcance tecnológico, o qual considera a quantidade total de códigos (subclasses) IPC envolvendo aquela tecnologia; e o potencial de expansão, que é equivalente ao número de códigos IPC diferentes cobertos por cada tecnologia. Os quatro últimos critérios são calculados baseados

no método de prospecção tecnológica envolvendo patentes proposto por [23].

A estrutura hierárquica do método AHP para a ordenação de tecnologias está representada na **figura 3**, e o método aqui descrito pode ser representado pelo fluxograma da **figura 4**.

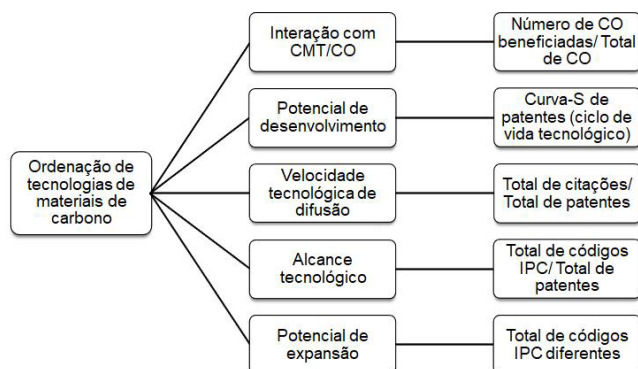


Fig. 3 – Estrutura hierárquica do AHP para a ordenação de tecnologias. Fonte: os autores.

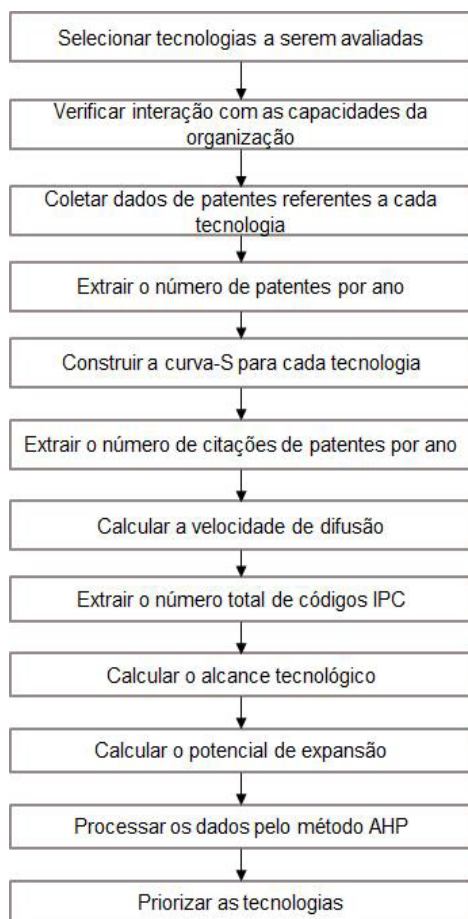


Fig. 4 – Fluxograma do método proposto. Fonte: Adaptado de [25].

6. Estudo de caso – Materiais de carbono para a defesa

O método proposto foi aplicado a um estudo de caso envolvendo materiais de carbono para a defesa, visto que esta área é de interesse do EB, que inclusive possui um núcleo de pesquisa no assunto no Centro Tecnológico do Exército (CTEx), o qual desenvolve um projeto em parceria com a Petrobrás para o desenvolvimento de fibras de carbono [36].

Além disso, esta área é extremamente promissora e aplicável em diversos setores industriais, tais como: aeronáutico, automobilístico, eletrônico, dentre outros.

6.1 Tecnologias avaliadas

Nos últimos anos, materiais de carbono – tais como grafeno, nanomateriais com carbonos hibridizados sp^2 bidimensionais e compósitos poliméricos – têm revolucionado áreas da química, física, ciência dos materiais e engenharia. O elevado destaque destes materiais pode ser atribuído às suas propriedades mecânicas, elétricas, ópticas e eletroquímicas diferenciadas, quando comparadas com aquelas dos materiais de carbono comuns [37].

A diversidade das aplicações, reais ou potenciais, desses novos materiais, assim como a necessidade de controlar as morfologias apropriadas para sua utilização, fazem da pesquisa nesta área um trabalho de característica interdisciplinar, envolvendo fatores que definem o sucesso de suas aplicações, tais como rota de síntese, processamento em formas variadas e qualidade [38].

No que diz respeito aos materiais compósitos poliméricos estruturais (também denominados avançados), após décadas de uso restrito em alguns setores da indústria, como na área de mísseis, foguetes e aeronaves de geometrias complexas, eles têm ampliado a sua utilização em diferentes setores da indústria moderna, com um crescimento de uso de 5% ao ano. Eles se destacam por sua leveza e alta resistência. Atualmente, a utilização de estruturas de alto desempenho e com baixo peso tem sido feita nas indústrias automotiva, esportiva, de construção civil,

entre outras. Mais especificamente, sua aplicação está distribuída, ao nível mundial, nos seguintes ramos da indústria: aeronáutico comercial 60%, defesa e espaço 20%, recreativo 10% e indústrias em geral 10% [39].

Os nanotubos de carbono possuem propriedades mecânicas, elétricas e térmicas excepcionais. Eles resistem a pressões de até 200 GPa, enquanto os de aço inoxidável tem um limite de resistência de 1,5 GPa. Também possuem as mais diversas aplicações, foram descobertos em 1991 e, sem dúvida, serão uma das tecnologias emergentes mais promissoras do futuro [40].

Como já mencionado, materiais de carbono, em especial a fibra de carbono, são de interesse da defesa, em especial do EB. A Seção de Tecnologia de Materiais de Carbono do CTEEx, em parceria com a Petrobrás, desenvolve tecnologia nacional para a produção de materiais estratégicos de carbono a partir de materiais secundários da indústria de petróleo. A matéria prima para esse processo é a borra que sobra no fundo dos barris de petróleo (5 a 10% do barril), de baixíssimo valor agregado, proveniente dos processos de refino da Petrobras e cedida a custo zero para o CTEEx, visto que o rejeito desse material possui um custo elevado para a empresa. O projeto teve início em 2002, com a fiação do primeiro filamento de piche tendo acontecido em 2004, e a do primeiro filamento de fibra de carbono em 2005.

A fibra produzida no CTEEx gera um rolo de três a trinta mil fios bobinados que são moldados a um material cerâmico, compósito ou a uma resina, que dá forma à fibra tecida, dependendo da sua aplicação. Esse material é dez vezes mais resistente e quatro vezes mais leve que o aço e possui diversas aplicações duais (militar e civil), tais como: armamento leve, proteção balística, viaturas, construção de aeronaves, captação de energia eólica dentre outras.

Fica clara aqui a imensa gama de aplicações desses materiais de carbono e, com isso, a importância que as tecnologias nessa área de conhecimento terão para o futuro. Sendo assim, após extensa revisão da literatura utilizando as bases de dados de artigos científicos *Scopus*, *Google Scholar* e *Derwent Innovation*, foram selecionadas 10 potenciais tecnologias emergentes

na área de materiais de carbono avançados para serem priorizadas utilizando o método proposto neste trabalho. Esta foi uma triagem inicial, a qual foi validada por especialistas da Seção de Tecnologia de Materiais de Carbono do CTEEx que propuseram mais seis tecnologias adicionais, totalizando 16, conforme mostra a **tabela 3**.

Tab. 3 – Tecnologias na área de materiais de carbono

Tecnologias	Principais aplicações
Fibra de carbono	Aviação, armamento, esportes, estruturas, proteção óptica e contra à corrosão [48, 49, 51]
Nanotubos de carbono	Biosensores, nanosensores, células solares, eletroanálise para identificação de drogas, circuitos micro e nano-eletrônicos, micro e nano processadores, construção civil, tecidos de alta resistência, blindagem pessoal [40, 48, 49]
Nanodiamante	Dispositivos optoeletrônicos, lubrificantes, abrasivos, aditivos para combustíveis, cosméticos para pele, medicamentos oncológicos, sensores biológicos, computação quântica, processamento óptico [48, 50]
Nanodots de carbono	Fotocatálise, conversão de energia, optoeletrônicos e sensores [51]
Nanopartículas poliméricas	Membranas poliméricas para tratamento de água, aplicações farmacêuticas (aumento da absorção de medicamentos, estabilização de fármacos, mascaramento de sabor, etc.) [52]
Carvão e carvão ativado	Pigmentos, purificação, filtros, respiradores, catálise e sensores [49]
Filmes finos de carbono	Sensores, proteção abrasiva, ferramentas de corte, camada de proteção óptica, células fotovoltaicas orgânicas (OPV) [48, 50]
Grafeno	Atuadores para aplicações espaciais, armazenamento, de hidrogênio, filtração de água, dispositivos eletrônicos (sensores, baterias, displays, supercapacitores, células solares), produção de nanotubos de carbono [48, 50]
Polímeros conjugados	Células solares, dispositivos eletrocrômicos, supercapacitores, sensores eletroquímicos, semicondutores, OLED-organic light-emitting diode, membranas biomédicas, janelas inteligentes [52]
Carbeto de Silício	Abrasivo, semicondutores e blindagem passiva [53]
Carbeto de Boro	Material absorvedor de radiação, e abrasivo para polimento, lapidação e Esmerilhamento [54]
Piche de petróleo	Eletrodos, Produção de Fibra de Carbono [49]
Negro de fumo	Pneus e tintas [49]
Grafite com pureza nuclear	Material moderador [55]
Grafites especiais	Baterias, Material dissipador de calor, Indústria Química, Produção de Silício e Aço [56]
Grafite expandido	Supercondutores, blindagem de interferência magnética, produção de grafeno [57]

Fonte: os autores.

Existem estudos de prospecção tecnológica com análise de patentes envolvendo algumas das tecnologias selecionadas, a saber: [23], [41], [42], [43],

[44], [45], [46] e [47]. Contudo, eles diferem deste trabalho pois são focados em apenas uma tecnologia ou uma aplicação mais específica da mesma.

6.2 Aplicação do método proposto

O método consiste em doze etapas, conforme apresentado no fluxograma da **figura 4**. A primeira etapa de seleção de tecnologias foi descrita anteriormente, na qual foram selecionadas 16 tecnologias na área de materiais de carbono para serem priorizadas.

A segunda etapa consiste na aplicação do primeiro critério determinado para análise: a interação com as capacidades da organização, que neste estudo de caso para o EB são as CMT e CO. Como as CMT se desdobram nas CO (**tabela 4**).

Tab. 4 –Matriz de comparações paritárias.

	Interação CMT/CO	Pot. Des.	Vel. Dif.	Alcance tecnológico	Pot. exp.
Interação CMT/CO	1	2	2	2	2
Pot. Des.	1/2	1	3	3	3
Vel. Dif.	1/2	1/3	1	2	2
Alcance tecnológico	1/2	1/3	1/2	1	1/3
Pot. exp.	1/2	1/3	1/2	3	1

Fonte: os autores.

Foram utilizadas as 38 CO para avaliar as 16 tecnologias. As CO foram cruzadas com as tecnologias em uma tabela e com base na descrição de cada CO contida em [35] e nas principais aplicações de cada tecnologia listada, definiu-se com quantas CO cada tecnologia poderia contribuir. Essa etapa foi realizada baseada no julgamento do decisor, apesar de poder ser feita também com o auxílio integrado de especialistas e combatentes do EB. O valor atribuído a cada tecnologia sob à luz deste primeiro critério foi o valor dado pela razão do número total de CO com as quais aquela tecnologia pode contribuir sobre o número total de CO (38). Ou seja:

$$V_{ij} = w/z \quad (2)$$

Em que V_{ij} é o valor atribuído a tecnologia i sob à luz do critério j , w é o número total de capacidades com as

quais a tecnologia i pode contribuir e z é o número total de capacidades. Neste estudo de caso, todas as tecnologias contribuem com pelo menos uma capacidade operativa, tendo destaque o grafeno e o grafite expandido, que contribuem com 27 das 38 CO. Os valores finais foram normalizados.

Em seguida, na terceira etapa do processo, são coletadas as patentes para cada tecnologia. Essa coleta foi feita no banco de dados da plataforma *Lexis Nexis*, que cobre todos os principais escritórios de patentes do mundo. Para a busca, foram utilizados como palavras-chave para cada tecnologia o nome de cada uma delas em inglês, conforme mostrado na **tabela 5**. Esses termos foram utilizados para coletar os documentos de patentes para cada tecnologia e baseado nesse resultado, foram extraídos o número total de patentes, de citações, de códigos IPC e de códigos IPC diferentes. O período escolhido para busca foi de 01 de janeiro de 1990 a 31 de dezembro de 2017, visto que o período de vigência de uma patente a contar de sua publicação é de no máximo 20 anos.

O quarto passo é extrair o número de patentes por ano e em seguida construir a curva-S de cada tecnologia baseada no número acumulado dessas patentes.

Tab.5 –Ordenação final das tecnologias.

Ordenação final	
Grafeno	1,000
Grafite expandido	0,989
Nanotubos de carbono	0,913
Piche de petróleo	0,911
Polimeros conjugados	0,883
Fibra de carbono	0,868
Carbeto de Silício	0,841
Nanodiamante	0,838
Carvão e carvão ativado	0,784
Carbeto de Boro	0,768
Filmes finos de carbono	0,742
Negro de fumo	0,726
Nanodots de carbono	0,698
Nanopartículas poliméricas	0,686
Grafites Especiais	0,672
Grafite (com pureza nuclear)	0,564

Fonte: os autores.

A **figura 5** mostra a curva-S para a tecnologia fibra

de carbono, todas as 16 tecnologias encontram-se no estágio de crescimento ou maturidade, dessa forma, todas receberam o valor 1.

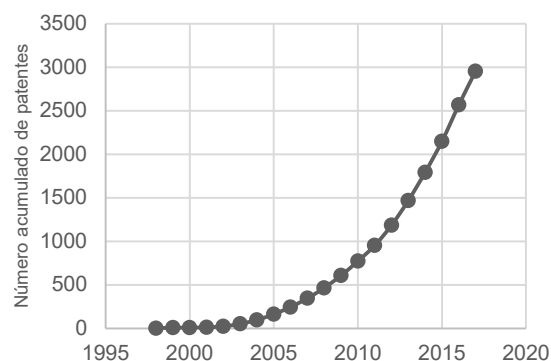


Fig. 5 – Curva-S para a tecnologia nanopartículas de carbono. Fonte: os autores.

A **tabela 6** mostra um resumo dos principais dados coletados na pesquisa.

A próxima etapa é calcular a velocidade de difusão baseada no número de citações. Segundo Gay [58], a primeira citação de uma patente ocorre em média quatro anos após a sua publicação. Sendo assim, são consideradas para difusão as patentes publicadas até 2013.

Tab 6 – Resumo dos principais dados coletados.

Tecnologias (palavras-chave)	Total de patentes	INPADOC1	Total de citações	Total de códigos IPC	Total de códigos IPC ≠
Fibra de carbono (carbon fiber)	121355	114646	378048	252406	122
Nanotubos de carbono (carbon nanotube)*	66814	48712	208735	108073	120
Nanodiamante (nanodiamond)	1336	1040	2566	2532	69
Nanodots de carbono (carbon nanodot)	145	130	80	272	18
Nanopartículas poliméricas (polymer nanoparticle)	2023	1537	7738	3658	80
Grafite expandido (expanded grafite)	8912	8041	20225	17625	103
Carvão e carvão ativado (coal or activated coal)	262219	252571	173918	517326	123
Filmes finos de carbono (carbon thin film)	1910	1566	13255	3352	66
Grafeno (graphene)	56535	45436	39326	90320	120
Polímeros conjugados (conjugated polymers)	9493	6070	67733	10786	77
Carbeto de Silício (silicium carbide)	150	121	414	268	45
Carbeto de Boro (boron carbide)	11019	8687	46515	18083	112

Tecnologias (palavras-chave)	Total de patentes	INPADOC1	Total de citações	Total de códigos IPC	Total de códigos IPC ≠
Piche de petróleo (coal tar)	10175	8876	24308	18718	97
Negro de fumo (carbon black)	121612	99775	300678	218731	121
Grafite com pureza nuclear (nuclear graphite or high purity graphite)	1708	1374	1513	2817	61
Grafites especiais (special graphite)	275	241	229	490	43

Fonte: os autores.

Em seguida, calculam-se o alcance tecnológico e o potencial de expansão, conforme detalhado anteriormente. A **tabela 7** fornece os resultados obtidos para cada tecnologia analisada.

Tab. 7 – Resultados da aplicação dos critérios

Tecnologias	Interação CMT/CO	Total de patentes para difusão	Veloc. de difusão	Alcance tecno.	Pot. Exp.
Fibra de carbono	22	74.124	5,100	3,115	122
Nanotubos de carbono	21	39.144	5,332	3,124	120
Nanodiamante	22	630	4,073	1,921	69
Nanodots de carbono	20	19	4,211	0,552	18
Nanopartículas poliméricas	7	1.051	7,363	3,825	80
Grafite expandido	27	4.484	4,510	2,269	103
Carvão e carvão ativado	13	139.548	1,246	0,663	123
Filmes finos de carbono	21	1.729	7,666	6,940	66
Grafeno	27	13.084	3,006	0,696	120
Polímeros conjugados	23	6.606	10,253	7,135	77
Carbeto de Silício	16	123	3,366	2,760	45
Carbeto de Boro	11	6.979	6,665	4,221	112
Piche de petróleo	22	6.046	4,021	2,389	97
Negro de fumo	7	71.667	4,195	2,472	121
Grafite com pureza nuclear	2	841	1,799	0,886	61
Grafites especiais	18	111	2,063	0,833	43

Fonte: os autores.

Por fim, processam-se os resultados dos critérios estipulados pelo método AHP, a fim de se obter um valor final para cada tecnologia. Os valores finais para cada critério foram normalizados. A importância entre os critérios é definida pela matriz de comparações paritárias, representada na **tabela 4**, cujos valores foram determinados pelos decisores.

A **tabela 5** apresenta a ordenação final obtida para as tecnologias analisadas, com os valores normalizados.

7. Discussão e Conclusão

A prospecção de tecnologias futuras é uma tarefa complexa devido às incertezas e à constante mutação das condições do mundo e do mercado. Além disso, informações na área de CT&I são vastas e provêm das mais variadas fontes. Nesse sentido, este trabalho propõe um método de prospecção para a priorização de tecnologias emergentes promissoras baseado em dados de patentes e capacidades da organização que deseja priorizá-las.

O método é baseado em dois outros já consagrados na literatura: o método multicritério de análise hierárquica (AHP) e o método quantitativo de prospecção de análise de patentes. Como critérios, foram escolhidos o alinhamento com as capacidades da organização com interesse na priorização de tecnologias, e outros quatro critérios baseados no trabalho de Altuntas [23]: potencial de desenvolvimento baseado no estágio do ciclo de vida tecnológico (curva-S), potencial de difusão da tecnologia, alcance tecnológico e potencial de expansão.

Além disso, o método proposto facilita a tomada de decisão no que diz respeito a investimentos em P&D, capacitação de pessoal, rede de parcerias e tudo que esteja relacionado com o desenvolvimento das tecnologias priorizadas. Pois uma tecnologia apontada como de alta prioridade oferece menos riscos e possui maiores chances de sucesso futuro, podendo receber mais incentivos que outras que possuem menor prioridade.

Sendo assim, o método aqui descrito oferece respostas para questões como: quais tecnologias são mais apropriadas para investimento em P&D e qual a ordem de prioridade para determinados projetos envolvendo essas tecnologias. Gestores, chefes e decisores podem se beneficiar do método para priorizar projetos baseado no potencial de futuro de cada um deles.

A utilidade do método proposto foi validada em um estudo de caso para avaliar 16 tecnologias na área de materiais de carbono para a defesa, uma área-chave para o EB. Apesar do trabalho de Altuntas [23] comparar 3 tecnologias na área de eletrônica digital, ele não considera as capacidades a serem desenvolvidas ou aprimoradas pela organização e também não utiliza o método AHP. Além

disso, na busca por patentes de Altuntas [23], foi utilizada uma plataforma que busca as palavras-chave apenas nos títulos das patentes, enquanto neste trabalho a busca foi feita no título, resumo, palavras-chave e reivindicações das patentes, o que certamente conduziu a resultados mais completos.

Dos resultados obtidos no estudo de caso, a tecnologia grafeno ganhou a maior prioridade, seguida de grafite expandido, nanotubos de carbono e piche de petróleo. Este resultado faz sentido, visto que, dentre as tecnologias analisadas, grafeno e nanotubos de carbono estão entre as quatro tecnologias que mais possuem patentes no mundo, bem como as que possuem mais artigos publicados no Brasil², além de serem a terceira e a segunda tecnologias com mais artigos publicados no mundo, respectivamente. Essas duas tecnologias ainda possuem o mesmo potencial de expansão (0,975), e grafeno tem a segunda maior velocidade de difusão (0,748) e a maior interação com as CO (1,00).

Já piche de petróleo e grafite expandido estão entre as dez tecnologias que mais possuem artigos no mundo e no Brasil e entre as oito que possuem mais patentes. Porém grafite expandido, assim como o grafeno, possui a maior interação com as CO (1,00) e a terceira maior velocidade de difusão (0,718), seguido de piche de petróleo com a quarta maior velocidade de difusão (0,65).

De fato, grafeno é uma tecnologia disruptiva com extremo potencial de futuro, visto que possui uma vasta e importante gama de aplicações, além de existirem muitas pesquisas sobre o tema no Brasil e no mundo. Além disso, as três primeiras tecnologias possuem relevância em listas de tecnologias resultado de exercícios de prospecção tecnológica de países, organizações e empresas como: Alemanha [60], Estados Unidos [61], União Europeia [62] [63] [64], Lanlink [65] e Fórum Econômico Mundial (*World Economic Forum*) [66].

Cabe ressaltar que nenhuma das tecnologias que ficaram mais bem colocadas em cada critério figuram entre as quatro primeiras no ranking geral, demonstrando a importância de se considerar mais de um critério e a abrangência do método. Além disso, era esperado que

²Para efeito comparativo, foram coletadas as quantidades de artigos científicos de cada tecnologia no mundo e no Brasil pela plataforma *Scopus* de 1997 a 2017

fibra de carbono figurasse entre as primeiras prioridades, visto que o EB já possui um núcleo de desenvolvimento focado nessa tecnologia e ela contribui bastante para o desenvolvimento das CO (0,815). Entretanto, deve-se lembrar que a fabricação dessa fibra é realizada com a matéria prima do piche de petróleo, a qual é a quarta tecnologia de maior importância no resultado final.

Contudo, existem algumas limitações deste estudo. Primeiro, a plataforma utilizada para coletar os dados

(Lexis Nexis) é bastante completa e robusta, porém é uma plataforma paga, não tendo livre acesso, apesar de existirem outras de acesso aberto, porém não tão completas. Segundo, os decisores deste estudo de caso foram os próprios autores do artigo – com exceção da seleção das tecnologias que obteve auxílio de especialistas externos – o que pode ser aprimorado com mais decisores na equipe de decisão e/ou apoio de pesquisadores da área.

Ainda, existem muitos outros fatores que afetam a

tomada de decisão na área de CT&I no que diz respeito a investimento em P&D tais como: tempo de retorno do investimento, objetivo final do projeto, custo e qualidade de instalações, força de trabalho etc. [6] [23]. Esses fatores devem ser levados em consideração na hora de tomar a decisão final pelo investimento em uma das tecnologias priorizadas.

Como estudos futuros, se propõe estudar um melhor uso dos códigos IPC, além de somente considerá-los quantitativamente. Também, sugere-se definir com mais precisão os pontos que definem os estágios do CVT na curva-S, podendo comparar melhor o critério potencial de desenvolvimento de cada tecnologia, existem modelos matemáticos que podem ser utilizados [23][59]. Por fim, o potencial de inovação de cada tecnologia pode ser considerado como um dos critérios, visto que ele pode ser obtido por meio de uma análise qualitativa das patentes coletadas.

Referências Bibliográficas

- [1] F. C. B. Madeu, P. C. Pellanda, L. O. de Araujo, L. L. Fernandes, I. B. Júnior. Prioritization of potential agreements between science, technology and innovation institutions: Prospective analysis for sorting countries according to interest areas of Brazilian Army from the scientific and technological perspectives. Em III Congresso Internacional de Innovación y Tendencias en Ingeniería, Bogotá, Colômbia, outubro 2017.
- [2] R. L. Ackoff. A Concept of Corporate Planning. John Wiley & Sons, 1970. [3]
- [3] M. Godet. Creating Futures Scenario Planning as a Strategic Management Tool. Economica, 2006.
- [4] L. Boyer, N. Equilbey. Histoire du management. Editions d'Organisation, 1990.
- [5] M. Godet. The art of scenarios and strategic planning: Tools and pitfalls. Technological Forecasting and Social Change, vol. 65, 2000, p. 3-22.
- [6] J. E. Freitas. O sistema de inovação no setor de defesa no Brasil: proposta de uma metodologia de análise prospectiva e seus possíveis cenários. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília/ Escola de Administração. Brasília, 2013. 335 p. Orientador: Luiz Guilherme de Oliveira.
- [7] J. S. Hammond, R. L. Keeney, H. Raiffa. The Hidden Traps in Decision Making. Harvard Business Review, Decision Making (Best of HBR 1998), 2006.
- [8] A. Salo, T. Gustafsson, R. Ramanathan. Multicriteria Methods for Technology Foresight. Journal of Forecasting, vol. 22, 2003, p. 235-255.
- [9] T. J. Stewart. A critical survey on the status of multiple criteria decision-making theory and practice. OMEGA IJMS, vol. 20, n. 5/6, 1992, p. 569-586.
- [10] R. P. Hamäläinen. Facts or values – How do parliamentarians and experts see nuclear power? Energy Policy, vol. 19, n. 5, 1991, p. 464-472.
- [11] P. W. G. Bots, J.A.M. Hulshof. Designing multi-criteria decision analysis processes for priority setting in health policy. Journal of Multi-Criteria Decision Analysis, vol. 9, 2000, p. 56-75.
- [12] A. D. Henriksen. A technology assessment primer for the management of technology. International Journal of Technology Management, vol. 13, n. 5/6, 1997, p. 615-638.
- [13] A. C. Passos. Definição de um índice de qualidade para distribuidoras de energia elétrica utilizando o apoio multicritério à decisão e análise de séries temporais. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro/ Programa de pós-graduação em Engenharia Elétrica. Rio de Janeiro, 2010. 101p. Orientador: Reinaldo Castro Souza.

- [14] N. Bhushan, K. Rai. Strategic Decision Making: Applying the Analytic Hierarchy Process. Springer, Londres, 2003.
- [15] R. J. S. Grumbach. Prospectiva: a Chave para o Planejamento Estratégico. 2 ed. Rio de Janeiro: Catau, 2000.
- [16] J. Coates. Foresight in federal government policy making. Futures Research Quarterly, vol. 1, 1985, p. 29-53.
- [17] M. Zackiewicz, S. Salles-Filho. Technological foresight: um instrumento para política científica e tecnológica. Parcerias Estratégicas (Estudos Prospectivos), CGEE, março, 2001, p. 144-161.
- [18] B. R. Martin. The origins of the concept of foresight in science and technology: An insider's perspective. Technological Forecasting and Social Change, vol. 77, n. 9, 2010, p. 1438-1447.
- [19] R. Popper, L. Georghiou, J. C. Harper, M. Keenan, I. Miles. The Handbook of Technology Foresight. MPG Books, Cronwall, 2008.
- [20] D. D. M. Jungmann, E. A. Bonetti. A caminho da inovação: proteção negócios com bens de propriedade intelectual: guia para o empresário. Instituto Euvaldo Lodi (IEL), Brasília, 2010.
- [21] H. Ernst. The use of patent data for technological forecasting: The diffusion of CNC technology in the machine tool industry. Small Business Economics, vol. 9, 1997, p. 361-381.
- [22] R. S. Campbell. Patent trends as a technological forecasting tool. World Patent Information, vol. 5, n. 3, 1983, p. 137-143.
- [23] S. Altuntas, T. Dereli, A. Kusiak. Forecasting technology success based on patent data. Technological Forecasting and Social Change, vol. 96, 2015, p. 202-214.
- [24] D. F. Cioff. A Tool for Managing Projects: An Analytic Parameterization of the S-Curve. Intl. Journal of Project Management, vol. 23, 2005, p. 215-222.
- [25] D. N. Merino. Development of a technological S-curve for tire cord textiles. Technological Forecasting and Social Change, vol. 37, 1990, p. 275-291.
- [26] C.-Y. Liu, J.-C. Wang. Forecasting the development of the biped robot walking technique in Japan through S-curve model analysis. Scientometrics, vol. 82, 2010, p. 21-36.
- [27] K. K. Brockhoff. Instruments for patent data analyses in business firms. Technovation, vol. 22, n. 1, 1992, p. 41-59.
- [28] Z. Griliches. Market value, R&D and patents. Economics Letters, vol. 7, 1981, p. 183-187.
- [29] W. B. Ashton, R. K. Sen. Using Patent Information in Technology Business Planning – I. Research-Technology Management, vol. 31, n. 6, 1988, p. 42-46.
- [30] E. M. Rogers. Diffusions of innovations. The Free Press, Londres, 3 ed., 1983.
- [31] L. Huang, N. Wang. Status and Prospects of Technology Diffusion Research based on Patent Information. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol. 185, 2013, p. 167-180.
- [32] S.-B. Chang, K.-K. Lai, S.-M. Shang. Exploring technology diffusion and classification of business methods: Using the patent citation network. Technological Forecasting & Social Change, vol. 76, 2009, p. 107-117.
- [33] L. Gao, A. L. Porter, J. Wang, S. Fang, X. Zhang, T. Ma, W. Wang, L. Huang. Technology life cycle analysis method based on patent documents. Technological Forecasting and Social Change, vol. 80, n. 3, 2013, p. 398-407.
- [34] P. N. Figueiredo. Gestão da inovação: conceitos, métricas e experiências de empresas no Brasil. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- [35] Exército. Catálogo de capacidades do Exército 2015-2035. Relatório técnico, Exército Brasileiro, 2015.
- [36] C. F. D. Queiroz. Uma história institucional do centro tecnológico do exército (1979-2013). Dissertação de Mestrado, Fundação Getúlio Vargas/Centro de Pesquisa e Documentação de História Contemporânea do Brasil (CPDOC). Rio de Janeiro, março 2015. 101 p. Orientador: João Marcelo Ehlert.
- [37] J. Pyun. Graphene oxide as catalyst: Application of carbon materials beyond nanotechnology. Angewandte Chemie International Edition, vol. 50, n. 50, 2011, p. 46-48.
- [38] M. H. Herbst, M. I. F. Macedo, A. M. Rocco. Tecnologia dos nanotubos de carbono: tendências e perspectivas de uma área multidisciplinar. Química Nova, vol. 27, n. 6, 2004, p. 986-992.
- [39] M. C. Rezende, E. C. Botelho. O uso de compósitos estruturais na indústria aeroespacial. Polímeros – São Carlos, vol. 10, n. 2, 2000.
- [40] A. Kin-Taklau, D. Hui. The revolutionary creation of new advanced materials – carbon nanotube composites. Composites Part B: Engineering, vol. 33, n. 4, 2002, p. 263-277.
- [41] S.W.C. Chang, C.V. Trappey, A.J.C. Trappey, S.C.Y. Wu. Forecasting dental implant technologies using patent analysis. PICMET '14: Infrastructure and Service Integration, Kanazawa, Japan, 2014, pp. 1483-1491.
- [42] S. Jun, S. J. Lee. Emerging technology forecasting using new patent information analysis. International Journal of Software Engineering and its Applications, vol. 6, n. 3, 2012, p. 107-116.
- [43] J. Yoon, K. Kim. An analysis of property-function based patent networks for strategic R&D planning in fast-moving

- industries: the case of silicon based thin film solar cells. *Expert Systems with Applications*, vol. 39, n. 9, 2012, p. 7709–7717.
- [44] Y. H. Chen, C. Y. Chen, S. C. Lee. Technology forecasting and patent strategy of hydrogen energy and fuel cell technologies. *African Journal of Business Management*, vol. 4, n. 7, 2010, p. 1372-1380.
- [45] A. C. Cheng, C. Y. Chen. The technology forecasting of new materials: the example of nanosized ceramic powders. *Romanian Journal of Economic Forecasting*, vol. 5, n. 4, 2008, p. 88–110.
- [46] B. Yoon, Y. Park. Development of new technology forecasting algorithm: hybrid approach for morphology analysis and conjoint analysis of patent information. *Transactions on Engineering Management*, vol. 54, n. 3, p. 588–599.
- [47] T. D. Daim, G. Rueda, H. Martin, P. Gerdri. Forecasting emerging technologies: use of bibliometrics and patent analysis. *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 73, n. 3, 2006, p. 981–1012.
- [48] S. Kurbanoglu, S. A. Ozkan. Electrochemical carbon based nanosensors: A promising tool in pharmaceutical and biomedical analysis. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, vol. 147, 2018, p. 439-457.
- [49] G. Rius. Technologies of Carbon Materials. Syntheses and Preparations. In: *Carbon for sensing device*, capítulo 2, Springer, 2015, p. 15-35.
- [50] H. A. Amorim. Caracterização de filmes finos de carbono depositados por PECVD. Dissertação de Mestrado, Universidade de Campinas/Faculdade de Engenharia Elétrica da UNICAMP. Campinas, 1995. 77 p. Orientador: Edmundo da Silva Braga.
- [51] H. Li, Z. Kang, Y. Liu, S.-T. Lee. Carbon nanodots: synthesis, properties and applications. *Journal of Materials Chemistry*, vol. 22, 2012, 24230–24253.
- [52] T. A. Skotheim, R. L. Elsenbaumer, J. R. Reynolds. *Handbook of Conducting Polymers*. Marcel Dekker, Nova Iorque, 2 ed., 1998.
- [53] M. A. Sano. Dispositivos Optoeletrônicos. In: *Avaliação metrológica de emissores e detectores ópticos aplicados à caracterização de poluentes particulados atmosféricos*, capítulo 3. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro/ Programa de Pós-Graduação em Metrologia para Qualidade Industrial do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Rio de Janeiro, 2003. Orientador: Marcos Sebastião de Paula Gomes.
- [54] F. Thévenot. Boron Carbide: A Comprehensive Review. *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 6, 1990, p. 205–225.
- [55] E. Nightingale. *Nuclear Graphite* (US Atomic Energy Commission). Academic Press, Nova Iorque, 1962.
- [56] H. O. Pierson. *Handbook of Carbon, Graphite, Diamonds and Fullerenes: properties, processing and applications*. Noyes Publications, N. Jersey, 1993.
- [57] D.D.L. Chung. Electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon materials. *Carbon*, vol. 39, 2001, p. 279–285.
- [58] C. Gay, C. L. Bas, P. Patel, K. Touach. The determinants of patent citations: an empirical analysis of French and British patents in the US. *Economics of Innovation and New Technology*, vol. 14, n. 5, 2005, p. 339–350.
- [59] J. W. Zartha, F. Palop, B. Arango, F. M. Velez, A. F. Avalos. S-Curve analysis and technology life cycle: application in series of data of articles and patents. *Revista Espacios*, vol. 37, n. 7, 2016, p. 19-35.
- [60] W. Macdougall. *Industrie 4.0: Smart manufacturing for the future*. Technical Report 20750, Germany Trade and Invest, Berlin, 2014.
- [61] DARPA. *DARPA Open Catalog*. Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA), Virginia, EUA, 2018.
- [62] ECD. *Horizon 2020 - work programme 2016 - 2017 future and emerging technologies*. Technical report, European Commission Decision, 2016.
- [63] M. Penny; T. Hellgren; M. Bassford. *Future technology landscapes: Insights, analysis and implications for defence*. Technical report, RAND Europe Corporation, 2013.
- [64] B. Wepner; G. Huppertz ; J. L. Pino. *List of emerging technologies with security implications*. Technical Report 261512, Etcetera (Evaluation of Critical and Emerging Security Technologies for the Elaboration of a Strategic Research Agenda), 2012.
- [65] LANLINK. 17 tecnologias do futuro da TI, 2017. URL <https://www.lanlink.com.br/>. Acesso em: 17 fev 2018.
- [66] B. Meyerson; M. Dichristina. *Top 10 emerging technologies of 2016*. Technical Report 220616, World Economic Forum's Meta-Council on Emerging Technologies, 2016.

Propriedades óticas de filmes de CIGS depositados à temperatura ambiente por pulverização catódica a partir de um alvo quaternário

Paulo V. N. Costa*, Rodrigo A. Medeiro, Carlos L. Ferreira, Leila R. Cruz

Instituto Militar de Engenharia

Praça General Tibúrcio, 80, 22290-270

Rio de Janeiro, RJ, Brasil

*nogueirapv@gmail.com

RESUMO: Células solares de filmes finos de CIGS têm demonstrado eficiências comparáveis com as de silício multicristalino (23%), devido ao avanço no controle das propriedades da camada de CIGS que funciona como absorvedora da radiação solar. Este trabalho analisa as propriedades óticas de filmes de CIGS depositados à temperatura ambiente por pulverização catódica com rádio frequência a partir de um alvo quaternário. A pressão foi mantida em 6 mTorr e a potência foi variada entre 90 W e 160 W. Os filmes foram tratados termicamente, na ausência e na presença de vapor de selênio. Os resultados mostraram que tanto a potência quanto o tratamento térmico podem ser usados como parâmetros controladores da banda proibida e, consequentemente, da composição. Filmes depositados a 160 W e tratados a 150 °C, na presença de vapor de selênio, apresentaram banda proibida de 1,2 eV, valor da banda do $\text{Cu}(\text{In}_{0,7}\text{Ga}_{0,3})\text{Se}_2$, que possui a composição ideal para células solares.

ABSTRACT: CIGS thin film solar cells have reached efficiencies similar to the multicrystalline silicon ones (23%), mainly due to the progress in controlling the properties of the CIGS layer, which is the absorber of the solar radiation. This work analyses the optical properties of CIGS films deposited at room temperature by radio frequency magnetron sputtering using a single quaternary target. The pressure was maintained at 6 mTorr and the power ranged from 90 W and 160 W. After deposition, the films were treated in the absence and presence of selenium vapor. The results showed that both power and heat treatment can be used as controlling parameters of the bandgap and, consequently, of the composition of the films. CIGS films deposited at 160 W and treated at 150 °C in the presence of selenium vapor presented a bandgap of 1.2 eV, value associated with the $\text{Cu}(\text{In}_{0,7}\text{Ga}_{0,3})\text{Se}_2$, which has the ideal composition for solar cells application.

PALAVRAS-CHAVE: Propriedades óticas. CIGS. Filmes finos. Pulverização catódica.

KEYWORDS: Optical properties. CIGS. Thin films. Sputtering.

1. Introdução

Dentre os semicondutores utilizados como camada absorvedora de células solares fotovoltaicas, o disseleneto de cobre, índio e gálio (CuInGaSe_2 ou CIGS) é o que possui um dos maiores coeficientes de absorção, da ordem de 10^5 cm^{-1} , permitindo a absorção de quase 100 % da radiação solar incidente em uma espessura de 1 – 2 μm [1]. Além disso, pode ser produzido como tipo-n ou tipo-p, dependendo da sua estequiometria. Células solares de filme fino de CIGS têm demonstrado altas eficiências, comparáveis com a de silício multicristalino,

sendo que o maior valor reportado até o momento é de 23,4 % [2, 3].

Os filmes de CIGS constituem a parte mais importante da célula solar, pois atuam como camada absorvedora da radiação. Eles podem ser preparados por vários métodos de deposição, como: co-evaporação, eletrodeposição, pirólise química por spray, deposição por feixe molecular e pulverização catódica [1]. Nas células solares de CIGS mais eficientes, essa liga é depositada por co-deposição a partir da evaporação térmica de fontes individuais, seguida de um tratamento térmico em presença de

vapor de selênio (selenização) [4]. Porém, há várias dificuldades nesta técnica, como, por exemplo, a obtenção de uniformidade de deposição em grandes áreas, o complexo controle dos parâmetros de deposição das diferentes fontes e a perda de material durante a deposição.

Outro método utilizado para deposição da liga CIGS em células solares de alta eficiência é o da co-deposição de camadas precursoras por pulverização catódica, seguido da selenização [4], pois resolve o problema da regulação de estequiometria e morfologia dos filmes, devido ao método ser conduzido em duas etapas. Além disso, tem várias vantagens em aplicações industriais quando comparado à técnica de co-deposição a partir da evaporação térmica de fontes individuais. Ele é capaz de preparar filmes de CIGS uniformes em uma grande área, com alta taxa de deposição, permitindo um ganho na fabricação em larga escala.

As propriedades dos filmes de CIGS depositados por pulverização catódica dependem dos parâmetros de deposição, incluindo a potência de pulverização. Propriedades como cristalinidade e morfologia dependem da energia com a qual os átomos são depositados sobre o substrato. Essa energia pode ser fornecida por via térmica, quando há aquecimento de substrato, ou pela potência de pulverização. Além disso, a composição dos filmes de CIGS pode ser alterada em função dessa energia.

Atualmente, estudos vêm sendo desenvolvidos para a produção de filmes de CIGS por pulverização catódica a partir de um único alvo quaternário, o que teria as seguintes vantagens: simplicidade, potencial para altas taxas de deposição, boa uniformidade e bom aproveitamento de material [4 – 9]. Contudo, esses filmes, quando depositados à temperatura ambiente, são amorfos. Assim, em geral, ou a deposição é feita em substratos aquecidos ou os filmes são submetidos a tratamentos térmicos [10]. O tratamento térmico, por sua vez, deve ser conduzido em condições que evitem a perda de selênio, elemento com alta pressão de vapor, afetando a composição da liga. Em geral, a selenização é o processo adotado para evitar essa perda.

Frantz et al. [7] depositaram filmes de CIGS a

a partir de um único alvo quaternário com o intuito de evitar o tratamento de selenização. Para isso, os filmes foram depositados com potências de 100 W e 200 W, em substratos aquecidos a 550 °C. Segundo os autores, os filmes depositados em ambas as potências eram levemente deficientes em selênio, 45,2 % Se, para os depositados com 100 W, e 44,7 % Se, para os depositados com 200 W, enquanto que o alvo quaternário era composto de 50 % Se.

Com o intuito de evitar a selenização, mas em filmes depositados à temperatura ambiente, Zhang et al. [9] submeteram os filmes a tratamentos térmicos à temperatura de 550 °C, em atmosfera de nitrogênio a 5 atm, para evitar a evaporação do selênio. Entretanto, a quantidade de selênio nos filmes aquecidos era menor do que no alvo, com uma perda de 7,5 % [8], indicando que a pressão de tratamento não foi suficiente para evitar a evaporação do selênio. Dessa forma, deposições a partir de alvos quaternários levarão a filmes deficientes em selênio, sendo necessário o tratamento de selenização.

De fato, Peng et al. [5] submeteram filmes de CIGS ao tratamento de selenização a 575 °C e observaram que os filmes não tiveram perda de Se, diferentemente de Frantz et al. [7] e Zhang et al. [9], confirmando a hipótese de que a selenização repõe o Se perdido durante a deposição a partir de alvos quaternários. Então, nota-se a importância do tratamento de selenização para reposição de selênio, pois, quando não empregado, o tratamento térmico precisa de altas pressões (superiores a 5 atm) para evitar a evaporação do Se.

O CIGS é um semicondutor com banda proibida direta, que varia entre 1,02 – 1,68 eV. O valor da banda depende da composição da liga, que pode se situar entre a composição do disseleneto de cobre e índio (CuInSe_2 ou CIS), com banda de 1,02 eV, e a do disseleneto de cobre e gálio (CuGaSe_2 ou CGS), com banda de 1,68 eV. O gálio é introduzido no CIS substituindo o índio, com o objetivo de aumentar a banda proibida para valores mais próximos do ideal para conversão fotovoltaica, que é entre 1,15 – 1,20 eV [11]. Para se obter filmes de CIGS com esses valores de banda, a concentração de Ga

deve se situar entre 25 – 30 % [11]. Com isto, a composição ideal do CIGS para células solares é $\text{Cu}(\text{In}_{0,7}\text{Ga}_{0,3})\text{Se}_2$.

Neste estudo, filmes finos de CIGS foram depositados a partir de um único alvo quaternário de CIGS em um sistema de pulverização catódica com rádio frequência e magnetos, à temperatura ambiente. As propriedades óticas dos filmes foram investigadas em função da potência de deposição com o objetivo de obter filmes com a banda proibida próxima da ideal para conversão fotovoltaica.

2. Desenvolvimento

2.1 Materiais e método

Os filmes de CIGS foram depositados sobre vidro soda lime a partir de um único alvo quaternário de CIGS, da AJA International, com 3” de diâmetro, pela técnica de pulverização catódica com rádio frequência e magnetos, em um sistema construído no laboratório. Os seguintes parâmetros de deposição foram utilizados: temperatura – ambiente; distância de trabalho – 8,5 cm; pressão de base – $1,5 \cdot 10^{-5}$ Torr; potência – entre 90 W e 160 W; pressão de trabalho – 6 mTorr. O tempo de deposição foi variado de forma a garantir que os filmes tivessem a mesma espessura, em torno de 200 nm.

Após as deposições, o conjunto vidro/CIGS foi submetido a tratamentos térmicos na ausência e na presença de vapor de selênio, a 150 °C. Esse tratamento ocorreu em um forno tubular de quartzo, construído no laboratório, em atmosfera de argônio a 400 Torr. Os filmes ficaram sobre uma placa de grafite, apoiada diretamente sobre os aquecedores. O vapor de selênio era obtido através da evaporação de grãos de Se, colocados sobre a placa de grafite, ao redor dos filmes sob tratamento. As fases e cristalinidade dos filmes foram caracterizadas em um difratômetro modelo X’pert Pro da Panalytical. A transmitância foi analisada em um espectrofotômetro Cary, modelo 5000, da Varian.

2.2 Resultados e discussão

Os filmes depositados nas diversas potências entre 90 e 160 W e submetidos aos tratamentos térmicos com e sem selênio eram amorfos. Isso pode ser constatado na **figura 1**, que mostra os difratogramas de raios x dos filmes depositados a 160 W e tratados termicamente com e sem selênio. A literatura reporta que a selenização, além de repor o selênio perdido durante a deposição e o tratamento térmico, mantendo a estequiometria do CIGS, atua como um fundente, facilitando a cristalização [12]. De fato, observa-se no difratograma do filme tratado com selenização, em torno de 27 graus, o início de uma cristalização na direção [12] do CIGS (ficha JCPDS# 3511-02).

No entanto, a temperatura utilizada nesse trabalho, 150 °C, foi muito baixa e não permitiu a cristalização completa do filme. A temperatura utilizada ficou limitada de forma a evitar a reevaporação do selênio. Maiores temperaturas exigiriam tratamentos em pressões mais elevadas, da ordem de 5 atm [9], o que não era viável no equipamento disponível no laboratório.

A **figura 2** mostra os espectros de transmitância dos filmes de CIGS depositados a 90 W, 120 W e 160 W. Nota-se que a aresta de absorção dos filmes deslocou-se para maiores comprimentos de onda quando a potência de deposição aumentou. Ou seja, o aumento da potência de deposição causou um decréscimo na banda proibida dos filmes. O filme depositado a 90 W apresenta uma aresta de absorção um pouco abaixo de 950 nm, com banda proibida igual a 1,5 eV [13], que está próxima da banda do CuGaSe_2 (1,68 eV). O filme depositado a 160 W apresenta uma aresta em torno de 1200 nm, com banda proibida de 1,1 eV, valor próximo à banda do CIGS com a composição ideal, $\text{Cu}(\text{In}_{0,7}\text{Ga}_{0,3})\text{Se}_2$ (1,15 eV).

No entanto, filmes depositados a 160 W apresentaram uma segunda aresta de absorção abaixo de 800 nm, indicando a presença de outra fase. Filmes de CIGS, com a composição de gálio ideal para células solares, $\text{Cu}(\text{In}_{0,7}\text{Ga}_{0,3})\text{Se}_2$, têm uma banda proibida entre 1,15 – 1,20 eV, o que corresponde a uma aresta em torno de 1070 nm [11]. Logo, esses resultados

mostram que a potência de deposição pode ser usada como parâmetro controlador da banda proibida e, consequentemente, da composição do filme.

Na **figura 2**, percebe-se também que os valores da transmitância diminuíram com o decréscimo da potência. Esse comportamento pode estar relacionado com o caráter reflexivo adquirido pelos filmes depositados em baixa potência. Em filmes de Ag-In-Se, esse efeito acontece devido à dessegregação do selênio, que promove a formação de novas fases ricas em selênio [14, 15]. No CIGS, esse efeito pode ter ocorrido, tornando os filmes deficientes em selênio e ricos em In, adquirindo um caráter pseudo-metálico. Então, é provável que baixas potências tenham favorecido a precipitação de fases mais estáveis, ricas em Se, com a consequente formação de filmes não estequiométricos. Esses resultados confirmam que potências mais baixas não fornecem energia necessária para que filmes estequiométricos sejam obtidos.

Na **figura 3** está mostrado o espectro de transmitância de filmes de CIGS tratados termicamente a 150 °C. Nota-se que os valores de transmitância diminuíram quando comparados com os dos espectros da **figura 2**. A redução na transmitância é provavelmente devido ao efeito de segregação do Se via formação de fases ricas em Se [14, 15], que foi acentuado com o tratamento térmico.

Nota-se também que, com o tratamento térmico, os patamares de absorção se deslocaram para maiores comprimento de onda. O filme depositado a 90 W apresentou uma aresta de absorção um pouco abaixo de 1000 nm, e uma banda proibida de 1,3 eV, que está próxima da banda do $\text{Cu}(\text{In}_{0,7}\text{Ga}_{0,3})\text{Se}_2$ (1,15 eV). O filme depositado a 160 W apresentou uma aresta em torno de 1300 nm, com banda proibida de 1,0 eV, que está próxima da banda do CuInSe_2 (1,02 eV). Percebe-se então que a banda proibida dos filmes diminuiu com o tratamento térmico - a banda proibida do filme depositado a 90 W diminuiu de 1,5 para 1,3 eV, enquanto que a banda do filme depositado a 160 W diminuiu de 1,1 para 1,0 eV. Percebe-se que ambas as bandas se deslocam no sentido da banda do CIS, ou seja, da banda dos filmes ricos em In.

Assim, pode-se atribuir este efeito à segregação

do Se, pois essa segregação causa um aumento na concentração de In e, consequentemente, um decréscimo na concentração de gálio (como mencionado, a banda proibida depende da razão In/Ga). Logo, o tratamento térmico foi suficiente para aproximar a composição do filme depositado à baixa potência da ideal. Nos filmes depositados a potências mais altas (150 W e 160 W) a presença da segunda fase se tornou mais sutil. Então, além da potência, o tratamento térmico também pode ser usado como parâmetro controlador da banda proibida e, consequentemente, da composição.

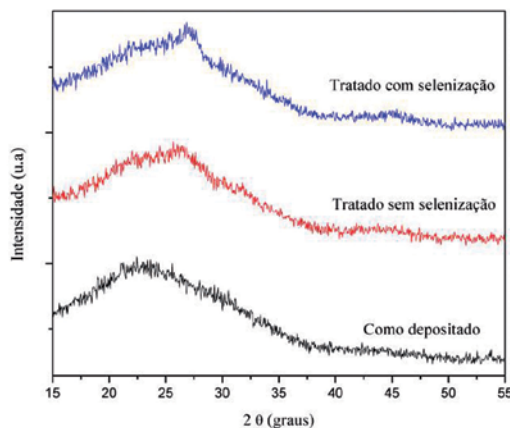


Fig. 1 – Difratomogramas de raios x de filmes de CIGS depositados a 160 W, como depositado e tratados termicamente a 150 °C, com e sem selenização.

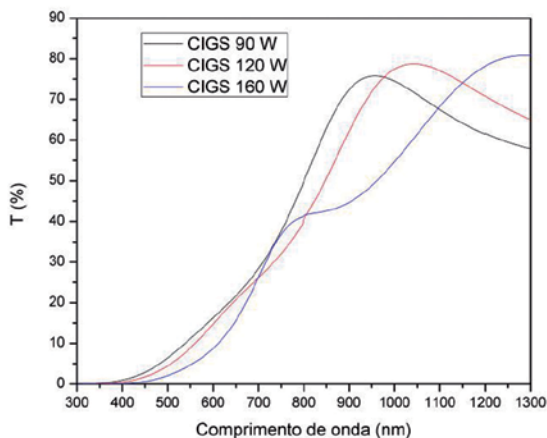


Fig. 2 – Espectros de transmitância de filmes de CIGS depositados com potências diferentes.

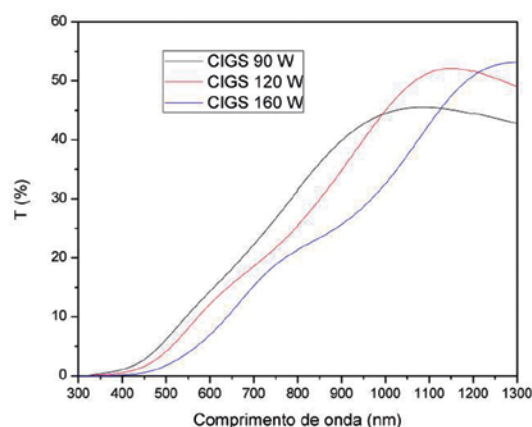


Fig. 3 – Espectros de transmitância de filmes de CIGS depositados com potências diferentes e tratados a 150 °C.

Na **figura 4**, está a comparação dos espectros de transmitâncias dos filmes de CIGS depositados a 160 W e tratados a 150 °C, com e sem selenização. Verifica-se que a presença de vapor de selênio deslocou a aresta de absorção para menores comprimentos de onda, em torno de 1100 nm, com uma banda proibida de 1,2 eV, que está de acordo com a banda proibida do $\text{Cu}(\text{In}_{0,7}\text{Ga}_{0,3})\text{Se}_2$ (1,15 eV). Portanto, o tratamento de selenização foi eficaz para repor a quantidade de selênio suficiente para produzir filmes com a composição ideal. Entretanto, a selenização não foi suficiente para tirar o caráter reflexivo dos filmes, daí a menor transmitância obtida.

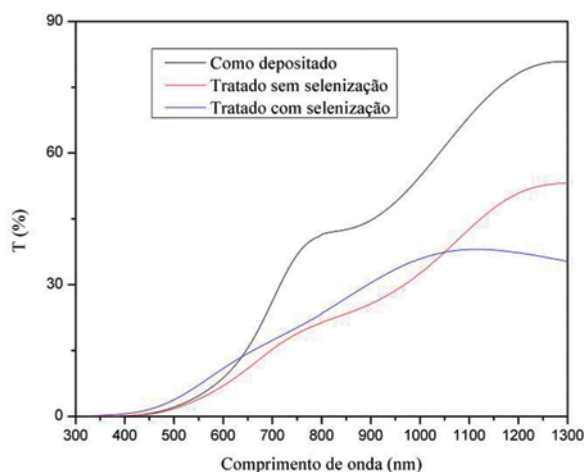


Fig. 4 – Espectros de transmitância de filmes de CIGS depositados com 160 W: como depositado, tratados termicamente a 150 °C, com e sem selenização.

A **tabela 1** resume os valores de banda proibida dos filmes de CIGS depositados em potências diferentes e tratados com e sem selenização. Vê-se que os filmes depositados em potências mais baixas, ou seja, taxas de deposição menores, apresentaram maiores valores de banda, enquanto os depositados em potências mais altas, taxas de deposição maiores, apresentaram menores valores de banda, aproximando-se do valor ideal reportado na literatura [12]. Observa-se que o tratamento térmico também levou à formação de filmes com banda mais próxima do valor ótimo, confirmando que a energia para formação de filmes de CIGS pode ser dada ou pela potência ou pelo tratamento, como discutido anteriormente. A selenização, como reportado na literatura [16], contribuiu para repor o selênio, ocasionando bandas de acordo com o valor ótimo. Este comportamento é mais bem observado na **figura 5**, que mostra a banda proibida dos filmes em função da potência de deposição e do tipo de tratamento. Filmes com a composição ideal podem ser obtidos com 150 – 160 W e com tratamento térmico a 150 °C, em presença de vapor de selênio.

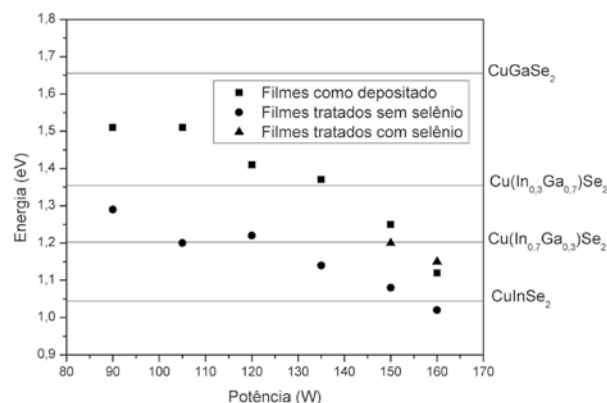


Fig. 5 – Banda proibida de filmes de CIGS depositados a 6 mTorr com potências e tratamento diferentes.

Tab. 1 – Banda proibida de filmes de CIGS depositados com diferentes potências e tratados termicamente a 150 °C,

Potência (W)	Como depositado Eg (eV)	Sem selênio Eg (eV)	Com selênio Eg (eV)
90	1,51	1,29	-
105	1,51	1,20	-
120	1,41	1,22	-
135	1,37	1,14	-
150	1,25	1,08	1,20
160	1,12	1,02	1,15

3. Conclusão

Filmes de CIGS foram depositados por pulverização catódica por rádio frequência à temperatura ambiente a partir de um alvo quaternário. Tanto a potência de deposição quanto o tratamento térmico podem ser usados como parâmetros controladores da banda proibida e, conseqüentemente, da composição. Com isso, os filmes de CIGS depositados a 160 W e tratados termicamente a 150 °C na presença de selênio

tiveram banda proibida em torno de 1,15 – 1,20 eV, valor ideal para camada absorvedora em células solares.

Agradecimentos

Este trabalho foi financiado pelo CNPq (proc. 401313/2014-0) e pela CAPES (Programa de Demanda Social).

Referências Bibliográficas

- [1] Kong, S. M.; Fan, R.; Jung, S. H.; Chung, C. W. Characterization of Cu(In,Ga)Se₂ thin films prepared by RF magnetron sputtering using a single target without selenization, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* vol. 19, 2013, pg 1320-1324.
- [2] ©Fraunhofer ISE: Photovoltaics Report, updated: 23 June 2020; disponível em <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>
- [3] Green, M. A.; Hishikawa, Y.; Dunlop, E. D.; Levi, D. H.; Hohl-Ebinger, J.; Yoshita, M.; Ho-Baillie, A. W. Y.; Solar cell efficiency tables (Version 53). *Prog. Photovolt. Res. Appl.*, vol 27, 2019, pg 3-12.
- [4] Liang, X. G.; Fan, O.; Chen, C. M.; et al. A promising sputtering for in situ fabrication of CIGS thin films without post-selenization. *Journal of Alloys and Compounds* vol. 610, 2014, pg 337-340.
- [5] Peng, X.; Zhao, M.; Zhuang, D; et al. Multi-layer strategy to enhance the grain size of CIGS thin film fabricating by single quaternary CIGS target. *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 710, 2017, pg 172-176.
- [6] Peng, X.; Zhao, M.; Zhuang, D; et al. Fabricating Cu(In,Ga)Se₂ thin films with large grains based on the quaternary CIGS targets. *Vacuum*, vol. 146, 2017, pg 282-286.
- [7] Frantz, J. A.; Bekele, R. Y.; Nguyen, V. Q; et al. Cu(in,Ga)Se₂ thin films and devices sputtered from a single target without addition selenization. *Thin Solid Films*, vol. 519, 2011, pg 7763-7765.
- [8] Xiao, P.; Ming, A.; Daming, Z.; et al. Two-stage method to enhance the grain size of Cu(In,Ga)Se₂ absorbers based on sputtering quaternary Cu(In,Ga)Se₂ target. *Materials Letters*, vol. 212, 2018, pg 165-167.
- [9] Zhang, L.; Zhang, D.; Zhao, M.; et al. The effects of selenium content on Cu(In,Ga)Se₂ thin film solar cells by sputtering from quaternary target with Se-free post annealing. *Vacuum*, vol. 137, 2017, pg 205-208.
- [10] Nogueira-Costa, P. V.; de Medeiros, R. A.; Ferreira, C. L.; Efeito do Tratamento Térmico sobre a Microestrutura e Morfologia de Filmes de CIGS Fabricados por Pulverização Catódica à Temperatura Ambiente; Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 23, 2018, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.
- [11] L. L. Kazmerski. Photovoltaics: A review of cell and module Technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 1, 1997, pg 71-170.
- [12] Park, H. Y.; Moon, D. G.; Yun, J. H.; et al. Efficiency limiting factors in Cu(in,Ga)Se₂ thin film solar cells prepared by Se-free rapid thermal annealing of sputter-deposited Cu-In-Ga-Se precursors. *Applied Physics Letters*, vol 103, 2013, pg 263903-1-263903-4.
- [13] Fahrenbruch, A. L.; Bube, R. H.; Fundamentals of Solar Cells, 1 ed., Academic Press: New York, 1983
- [14] Çolakoğlu, T.; Parlak, M.; Ozder, S.; Investigation of optical parameters of Ag-In-Se thin films deposited by e-beam technique; *Journal of Non-Crystalline Solids*, 354, 2008, 3630-3636
- [15] Çolakoğlu, T.; Parlak, M.; Structural characterization of polycrystalline Ag-In-Se thin films deposited by e-beam technique; *Applied Surface Science*, 254, 2008, 1569-1577
- [16] Yu, Z.; Yan, Y.; Li, S.; et al. Significant effect of substrate temperature on the phase structure, optical and electrical properties of RF sputtered CIGS films. *Applied Surface Science*, 264, 2013, 1997-201.

Avaliação de desempenho de Redes Tolerantes a Interrupções na troca de mensagens táticas entre navios de guerra

Davi Marinho de A Falcão^{a,b}, Ronaldo Moreira Salles^b, Paulo Henrique Coelho Maranhão^b

^aDiretoria de Sistemas de Armas da Marinha, Marinha do Brasil,

Rio de Janeiro, Brasil

^bInstituto Militar de Engenharia

Praça General Tibúrcio, 80, 22290-270

Rio de Janeiro, RJ, Brasil

*dmafalcao@gmail.com

RESUMO: *Disruption-Tolerant Networks (DTN) são uma evolução das Mobile Adhoc Network (MANET) onde DTN trabalham em cenários cujos nós estão esparsamente distribuídos, com baixa densidade, cujas conexões são intermitentes e onde uma infraestrutura fim-a-fim não está disponível. Portanto, DTN são recomendáveis para aplicações que apresentam latência alta que pode durar de horas até dias. O cenário marítimo possui características que justificariam o uso de redes DTN, então este trabalho propõe avaliar uma abordagem DTN no cenário marítimo envolvendo navios de guerra, em parceria com helicópteros, para o encaminhamento de mensagens táticas. As simulações compararam a performance dos protocolos Epidemic, Spray and Wait e Direct Delivery em 3 cenários com dimensões diferentes.*

PALAVRAS-CHAVE: DTN. Protocolo Epidemic. Mensagens Táticas. Cenário de Navios de Guerra.

ABSTRACT: *Disruption-Tolerant Networks (DTN) are an evolution of the Mobile Adhoc Network (MANET) where DTN work in scenarios whose nodes are sparsely distributed, with low density, whose connections are intermittent and where an end-to-end infrastructure is not available. Therefore, DTN are recommended for high latency applications which can last from hours up to days. The maritime scenario has characteristics that would justify the use of DTN networks, then this work proposes to evaluate DTN approach in the maritime scenario involving warships along with helicopters for the forwarding of tactical messages. The simulations compared the performance of the Epidemic, Spray and Wait and Direct Delivery protocols in 3 scenarios with different dimensions.*

KEYWORDS: DTN. Epidemic Protocol. Tactical Messages. Warship Scenario.

1. Introdução

O transporte marítimo é responsável por 90% do comércio internacional, o que justifica o grande investimento mundial no comércio marítimo e em áreas portuárias. Isto faz do mar uma área estratégica que gera riquezas para os países que possuem o conhecimento de como usar os seus recursos de forma apropriada.

Acompanhando a crescente demanda do transporte marítimo existe também a necessidade de manter os navios transmitindo e recebendo informações, tais como: geolocalizações, dados meteorológicos, o status de um determinado navio, pedidos de socorro, etc.

Soluções de comunicação para o ambiente marítimo são geralmente lentas e mais caras do que as soluções

terrestres [1]. Essas redes são baseadas em tecnologias de *High Frequency (HF)*, *Very High Frequency (VHF)* e *Ultra High Frequency (UHF)*, para comunicação perto da costa e sistemas de satélite para cobertura de áreas a longas distâncias [2].

Por isso é importante escolher uma infraestrutura de rede que suporte comunicação em cenários com nós esparsamente distribuídos.

Navios de guerra precisam trocar informações táticas entre eles durante operações e treinamentos. Contudo no alto mar, os navios sofrem com a frequente falta de conectividade porque naturalmente precisam se movimentar para longe de suas Estações Rádio Base.

Deve também ser mencionado que as tecnologias satelitais nem sempre são acessíveis, seja pelo alto custo

de implementação, seja pelos valores de alocação dos serviços. O risco de se obter soluções prontas que não haja transferência de conhecimento é considerado crítico quando o assunto envolve questões de defesa nacional.

Como uma alternativa de baixo custo para comunicações intermitentes dos cenários dos navios de guerra, esse trabalho analisa a adequabilidade dos protocolos DTN como infraestrutura de comunicação para esses navios.

As mesmas soluções adotadas para as comunicações terrestres sem fio não podem ser aplicadas com a mesma facilidade nos cenários marítimos, por causa das características naturais deste ambiente. Algumas alternativas para minimizar o problema inclui a instalação de *equipamentos* com baixas taxas de transmissão.

As redes táticas dos navios de guerra são responsáveis por distribuir informações oriundas dos subsistemas táticos. Contudo, os navios sofrem de muita intermitência de sinal, dificultando que as mensagens alcancem todos os destinatários. Isso faz com que aumente o número de retransmissões devido ao aumento da taxa de erros de entrega.

Por isso é importante escolher estratégias de roteamento que diminuam essas retransmissões, aumentando a probabilidade de sucesso na entrega [3]. Contudo, estratégias convencionais de roteamento TCP/IP requerem que os nós estejam presentes no raio de transmissão da rede sem fio. Em outras palavras, é necessário que pelo menos o nó intermediário esteja conectado à rede para que seja capaz de retransmitir informação para os nós remotos.

Por isso esse trabalho propõe uma abordagem híbrida de redes, mantendo as tecnologias de comunicação atualmente em vigor no cenário marítimo, porém incrementando essa capacidade com uma arquitetura do tipo *mesh*, contendo uma infraestrutura de redes DTN no interior dos navios.

Algumas características do cenário marítimo poderão favorecer as redes DTN nos navios de guerra, tais como: a baixa densidade na distribuição dos navios no mar, capacidade ilimitada de *buffer* e de energia disponíveis e velocidades dos navios

favorecendo contatos prolongados entre eles.

1.1 Objetivo

O presente artigo visa estudar e avaliar a performance de protocolos DTN em cenários marítimos envolvendo navios de guerra.

Os cenários marítimos foram obtidos através da composição de rotas reais de navios e helicópteros da Marinha do Brasil.

1.2 Metodologia

Os cenários marítimos serão simulados através de uma ferramenta de código aberto para redes oportunísticas conhecida como The ONE [4]. As simulações ocorrerão sobre 3 cenários distintos, diferenciados em termos de área, número de mensagens criadas, tamanho das mensagens e número de nós na rede.

Serão avaliadas as performances dos protocolos selecionados em cada cenário marítimo, levando-se em consideração: a taxa de entrega de mensagens, atrasos, número de navios e o impacto da presença de veículos de alta velocidade dentro do cenário (helicópteros, drones etc).

2. Trabalhos relacionados

O cenário marítimo [5] possui características peculiares que o torna compatível com redes tolerantes a interrupções.

No trabalho de Moshin e Woods [6] foi proposto o uso de Mobile Ad-hoc Network (MANET) [7],[8] como uma alternativa de baixo custo para a comunicação de navios através de comunicação de rádio VHF. A rede MANET apresentou limitações no ambiente marítimo em regiões com alta densidade de nós ou muito esparsas. O trabalho avaliou quatro protocolos MANET no cenário marítimo: Ad-hoc On-Demand Distance Vector Protocol (AODV), Ad-hoc On-Demand Multipath Distance Vector Protocol (AOMDV), Dynamic Source Routing Protocol (DSR) e Destination-Sequenced Distance Vector Protocol (DSDV), sendo que o AOMDV foi considerado o mais eficiente.

O trabalho de *Moshin et al.* [9] também tratou do assunto do uso de MANET em cenários marítimos, simulando três tipos diferentes de protocolos. Ele também recomendou a aplicação de MANET como uma alternativa de baixo custo para os navios e concluiu que as rotas que os navios desenvolvem tendem a facilitar a entrega de pacotes através de múltiplos saltos. Ainda de acordo com o texto, a performance dos protocolos MANET apresentou uma relação positiva com a densidade de nós no cenário, ao mesmo tempo que uma relação inversa quanto à mobilidade. Isso significa que as taxas de entrega aumentam com o número de navios na área e diminuem com o aumento da mobilidade, fazendo os cenários mais esparsos.

K. Youngbum [10] propôs o uso de uma rede similar à uma VANET (Vehicular Ad-hoc Network) no cenário marítimo chamada NANET (Nautical Ad-hoc Network). Uma NANET é uma arquitetura híbrida de redes em modo mesh que serviria para aumentar a capacidade de comunicação entre os navios. As simulações ocorreram em três cenários marítimos situado no porto, na costa e no oceano. Em todos eles a NANET foi simulada com os navios dentro e fora da cobertura de suas estações rádio base.

No entanto, o grande problema das MANET é que elas precisam estabelecer uma conexão fim-a-fim antes de enviar uma mensagem. Contudo, este requisito não é sempre possível nos cenários marítimos por causa da grande quantidade de conexões e desconexões.

Chrysostomou [2] também recomendou uma abordagem híbrida de arquitetura de redes envolvendo tecnologias convencionais e redes DTN no cenário marítimo. Ele também simulou três cenários que variaram em área, usando diferentes protocolos de roteamento: Epidemic, Prophet, MaxProp, Spray e Wait e RAPID. O trabalho concluiu que protocolos probabilísticos obtiveram uma melhor utilização dos recursos de rede e apresentaram uma boa performance na entrega de pacotes. O artigo também enfatiza sobre os benefícios das redes DTN nos cenários marítimos quando os nós estiverem esparsamente distribuídos.

O problema dos protocolos probabilísticos é que

eles precisam de um conjunto de informações prévias no intuito de gerar dados estatísticos, fazendo com que esses protocolos sejam muito sensíveis às mudanças. Essas mudanças podem trazer erros nas decisões de encaminhamento e perdas de oportunidades durante os encontros entre os nós.

Em cenários esparsos, com poucos nós, os protocolos que se comportam incentivando o estabelecimento de conexões poderiam melhor contribuir para a entrega de mensagens aos destinatários finais.

De uma forma geral, os trabalhos apresentados sobre redes Ad-hoc em cenários marítimos limitaram-se a analisar as capacidades dessas arquiteturas em embarcações civis, porém o trabalho atual tem a finalidade de avaliar o uso de redes tolerantes a atrasos e interrupções, em um ambiente de simulação, para o trâmite de mensagens dos sistemas táticos entre navios de guerra. Um cenário de guerra se enquadraria como um ambiente desafiador [11], portanto possui características que podem vir a ser exploradas pelas capacidades das redes DTN.

3. DTN no ambiente marítimos

Redes DTN são recomendadas em ambientes desafiadores [11], marcados por conexões intermitentes, ausência de uma infraestrutura fim-a-fim e que é beneficiada pela mobilidade dos nós [12], como acontece nos navios de guerra.

Outras características que tornam as redes DTN atrativas para o ambiente marítimo são [2]: a baixa densidade na distribuição dos navios, uma capacidade ilimitada de *buffer e de energia* e as velocidades dos navios favorecendo contatos prolongados entre eles [9]. Em geral, a arquitetura DTN [12] propõe uma melhoria na comunicação dos cenários onde não existe uma infraestrutura fim-a-fim [13],[14].

3.1 Protocolos de roteamento DTN

Roteamento em redes DTN é dividido basicamente em duas estratégias [15]: a primeira delas é a estratégia de Inundação, que se baseia na replicação de mensagens para uma grande quantidade de nós com o objetivo de alcançar o nó de destino. Nesta

abordagem, múltiplas cópias da mesma mensagem são criadas e enviadas através de um conjunto de nós denominados *relay nodes*. Esses nós armazenam as mensagens até que elas alcancem os nós de destino [16]. Protocolos baseados na estratégia de Inundação não necessitam de conhecimento a priori sobre as redes, pois eles não são probabilísticos.

A segunda estratégia é a de Encaminhamento, que usa de conhecimento a priori sobre as redes para selecionar o melhor caminho até o destinatário, pois seus protocolos são probabilísticos. Esta estratégia usa o conhecimento a priori da topologia da rede ou sobre qualquer outra informação importante que permita a escolha do melhor caminho para o destinatário. Dessa forma, as mensagens não serão roteadas aleatoriamente, mas baseando-se em informações previamente disponíveis.

Ainda existem abordagens híbridas que conciliam estratégias de inundação e de encaminhamento de acordo com a necessidade.

3.1.1 Single Hop Transition ou Direct Delivery

É considerado o algoritmo mais simples, em que a fonte transmitirá diretamente ao destinatário, imediatamente quando eles fizerem contato [15], portanto não há retransmissões através de nós intermediários. Nesse tipo de protocolo, cada nó carrega somente a sua própria mensagem, a grande vantagem disso é que não é necessário alocar grandes recursos de armazenamento para esse tipo de protocolo. Contudo, os tempos de atrasos das mensagens serão os mais elevados comparado com outros protocolos que realizam encaminhamentos. Outro importante detalhe é que esse comportamento diminui a probabilidade de entrega das mensagens aos destinatários. Esse tipo de protocolo só se recomenda quando percebe que há uma grande movimentação na rede e que os nós de origem e destino estão a um salto de distância, ou seja, eles são vizinhos.

3.1.2 Two-Hop Relay

Nesse protocolo, as retransmissões ocorrerão somente entre o nó de origem e aqueles com os quais

ele manteve contato no primeiro momento. Então esses nós deverão cooperar, levando consigo essas mensagens até encontrar o destinatário final, sem gerar mais retransmissões. Esse tipo de protocolo significativamente aumenta a probabilidade de entrega de mensagens, se comparado ao *Direct Delivery*, contudo ainda apresenta as mesmas limitações do protocolo anterior, além do aumento do uso de largura de banda e de armazenamento [15].

3.1.3 Epidemic Routing

O *Epidemic* é considerado o primeiro protocolo de roteamento DTN. Ele assume que cada nó possui largura de banda e armazenamento ilimitados, isso significa que teoricamente todo nó pode armazenar todas as mensagens recebidas durante os contatos estabelecidos. Cada nó mantém uma lista de mensagens em um banco de dados interno e poderá transmitir mensagens inteiras para outros nós, durante os contatos. Em cenários onde os nós estão esparsamente distribuídos e as mensagens trocadas são curtas, este pode vir a ser considerado um bom protocolo.

Contudo, o maior problema do roteamento epidêmico é que a mensagem continua se propagando, mesmo quando ela atinge o seu destinatário. Uma outra grande desvantagem é que esse tipo de roteamento consome uma grande quantidade de recursos [15]. Ele foi chamado de *Epidemic* por causa de seu comportamento, similar ao de uma transmissão de uma doença contagiosa, visto que o nó portador de uma mensagem irá tentar transmiti-la para todos os nós em contato, sem nenhum critério.

3.1.4 Spray and Wait

Este protocolo trabalha em duas fases, a primeira é chamada fase de *Spray* em que cada nó irá inundar a rede com cópias das mensagens para um número de L nós do tipo *relay node*, o valor de L é configurável no nó de origem. Se a mensagem alcança o nó de destino, a transmissão é interrompida, caso contrário ele entrará na fase de *Wait* em que os *relay nodes* podem transmitir somente durante a fase de contatos. O valor de L é calculado levando em consideração a densidade

dos nós, perfil de distribuição e de mobilidade [15].

4. Simulações

Esta seção é responsável por mostrar os resultados e as explicações sobre o que foi observado durante as simulações.

4.1 Resultados das simulações

Cada simulação correspondeu a um período de 12 horas de movimentação em um ambiente marítimo. Inicialmente os cenários foram simulados com a criação de apenas 16 mensagens ao todo, contudo foram realizadas simulações adicionais com 346, 585 e 587 mensagens. O tamanho das mensagens variou de 11 até 1000 bytes. Isso parte do princípio que as mensagens táticas trocadas entre os navios de guerra são poucas e curtas. O raio de transmissão foi configurado entre 12 e 13Km, as taxas de transmissão variando entre 300, 600, 1200 e 4800 bits por segundo. As velocidades dos navios variando de 0 até 18 *knots*.

Em algumas simulações foram incluídos veículos com maior velocidade, que representaram o apoio de helicópteros na comunicação com os navios. As velocidades dos helicópteros variaram de 100 até 300 Km/h.

Deste ponto em diante serão apresentados os resultados das simulações para cada um dos 3 cenários, mostrados nas **figuras de 1 a 3**, através da ferramenta OpenStreetMap. As rotas apresentadas nos cenários vieram da combinação de movimentações reais de navios e de helicópteros nos cenários marítimos. Sobre os cenários foram comparadas as performances dos 3 protocolos DTN mais citados: Direct Delivery, Epidemic e Spray and Wait.

Os seguintes dados estarão contidos nas tabelas:

- Número total de nós (*N.Nodes*);
- Uma *flag* que indica a existência ou não de helicópteros na simulação (*Helicopter*);

- Numero total de mensagens (*N.Messages*);
- Tamanho das mensagens (*Size*);
- Média de entregas (*A.V.Deliveries*); e
- Média de Atrasos (*A.V.Delays*).

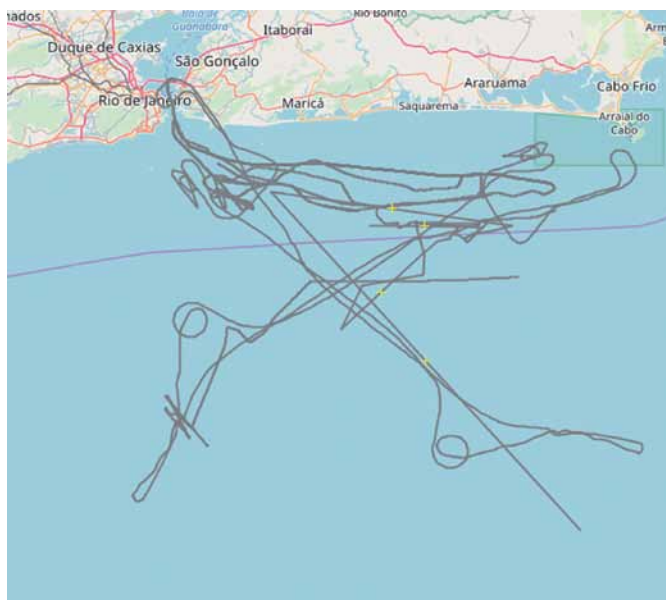


Fig. 1 – Cenário 1. Representa uma área de 150 Km², constituído de 8 rotas sobrepostas, sendo que duas delas usadas de forma exclusiva para helicópteros.

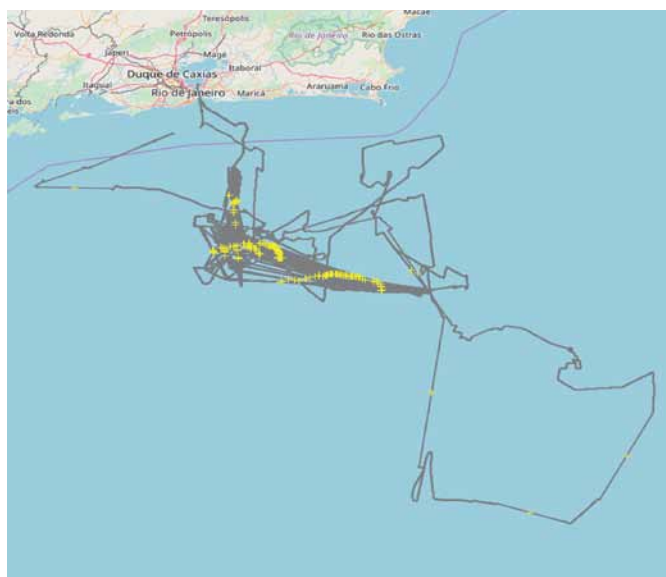


Fig. 2 – Cenário 2. Representa uma área de 400 Km², constituído de 2 rotas comuns para navios e helicópteros.

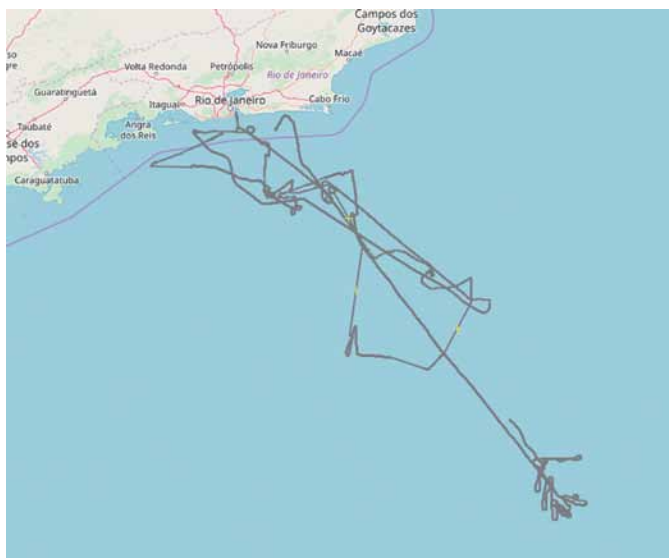


Fig. 3 – Cenário 3. Representa uma área de 600 Km², constituído de 3 rotas, sendo que uma delas é exclusiva para helicópteros.

4.1.1 Cenário 1

Nesse cenário, foram realizadas cerca de 200 simulações, cada uma representou 12 horas de movimentação com a criação de 16 mensagens, cada mensagem variando de 11 até 1000 bytes de tamanho. Esse cenário possui 36 navios, sendo que em alguns momentos 4 deles foram substituídos por helicópteros, no intuito de verificar o impacto da influência de veículos de maior velocidade. Os resultados estão presentes na **tabela 1**.

Tab. 1 – Cenário 1, resultados das simulações com o trâmite de 16 mensagens.

Protocol	N.Nodes	N. Messages	Size (bytes)	Helicopter	Av. Deliveries	“Av. Delays (Seconds)”
Epidemic	36	16	100	Not	15,54	633,55
				Yes	15,8	338,15
			1000	Not	15,525	716,46
				Yes	15,775	415,92
Direct Delivery	36	16	100	Not	10,13	4499,69
				Yes	10,17	4340,85
			1000	Not	10,119	4513,03
				Yes	10,165	4349,62
Spray And Wait	36	16	100	Not	14,075	2651,98
				Yes	14,58	2396,01
			1000	Not	14,055	2680,49
				Yes	14,585	2400,02

De acordo com os resultados, o protocolo Epidemic apresentou melhor performance na entrega de 16

mensagens no Cenário 1. Essa superioridade foi de 7.80% sobre o *Spray and Wait* e de 32.99% sobre o Direct Delivery. A performance dos protocolos podem ser visualizadas nas **figuras 4 e 5**.

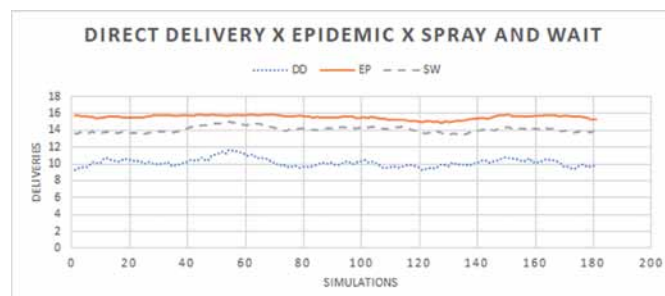


Fig. 4 – Cenário 1, Direct Delivery x Epidemic x Spray and Wait com entrega de mensagens de 1000 bytes.

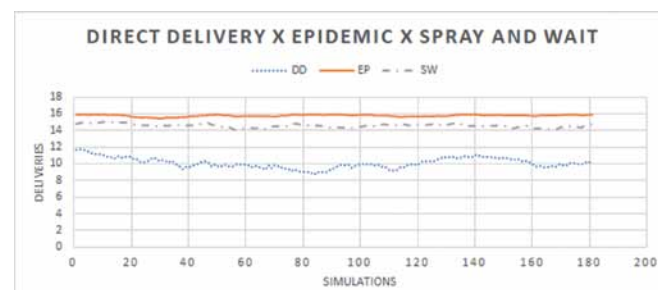


Fig. 5 – Cenário 1, Direct Delivery x Epidemic x Spray and Wait com entrega de mensagens de 1000 bytes, com helicópteros.

Pode-se perceber que os helicópteros, no Cenário 1, contribuíram com uma notável queda de 45.27% no tempo de atraso na entrega de mensagens usando o protocolo Epidemic, como pode ser visto na **figura 6**.

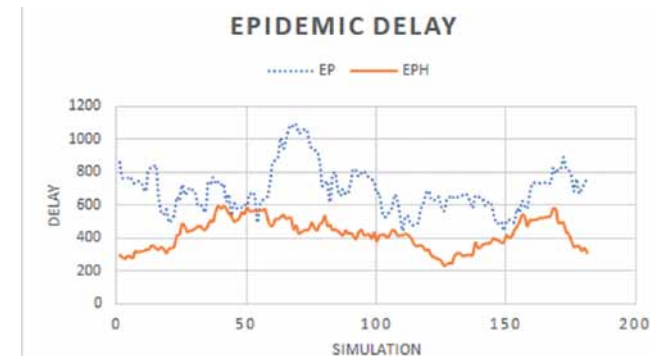


Fig. 6 – Cenário 1, comparação da média de atrasos do protocolo Epidemic com mensagens de 1000 bytes com e sem a influência dos helicópteros (EPH e EP, respectivamente).

As simulações no Cenário 1, de forma geral, mostraram o protocolo *Epidemic* como aquele que apresentou melhor performance na entrega de mensagens, cerca de 98.45%. Na sequência veio o *Spray and Wait* entregando 90.65% das mensagens e por fim o *Direct Delivery*, entregando cerca de 65.46% das mensagens.

4.1.2 Cenário 2

Nas primeiras simulações do Cenário 2 foram usadas as mesmas configurações do Cenário 1. Os resultados estão apresentados na **tabela 2**.

Tab. 2 – Cenário 2, resultados das simulações com o trâmite de 16 mensagens.

Protocol	N. Nodes	N. Messages	Size(bytes)	Helicopter	Av. Deliveries	"Av. Delays (Seconds) "
Epidemic	36	16	100	Not	8,005	6195,52
				Yes	10,75	5513,56
			1000	Not	7,94	6243,4
				Yes	10,72	5593,83
Direct Delivery	36	16	100	Not	2,425	5282,99
				Yes	2,68	5563,86
			1000	Not	2,425	5289,41
				Yes	2,68	5599,31
Spray And Wait	36	16	100	Not	5,495	6287,03
				Yes	8,16	6285,76
			1000	Not	5,48	6328,35
				Yes	8,15	6305,29

O Cenário 2 apresentou uma redução de performance na entrega de mensagens em todos os protocolos quando comparado ao Cenário 1. Isso ocorreu pelo fato do aumento significativo de 250 km² de área do novo cenário, mantendo-se a mesma quantidade de 36 nós. Portanto, a taxa de entrega de mensagens pelo protocolo *Epidemic* foi de 61%, no *Spray and Wait* foi em torno de 45% e no *Direct Delivery* foi de 17.55%, das 16 mensagens criadas. Porém o protocolo *Epidemic* continuou apresentando a melhor performance, entregando 43.43% mais do que o *Direct Delivery* e 16% mais do que o *Spray and Wait*. Essa sequência pode ser visualizada nas **figuras 7 e 8**.

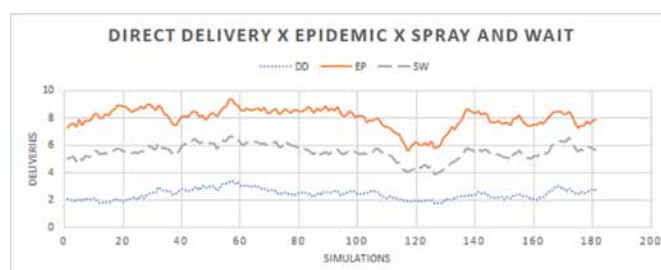


Fig. 7 – Cenário 2, Direct Delivery x Epidemic x Spray and Wait com entrega de mensagens de 1000 bytes.

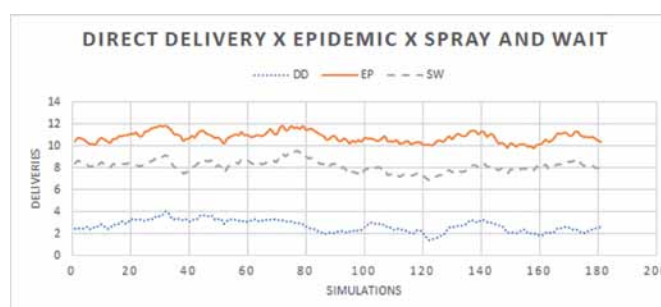


Fig. 8 – Cenário 2, Direct Delivery x Epidemic x Spray and Wait com entrega de mensagens de 1000 bytes, com helicópteros.

Os helicópteros provocaram uma redução de 11.20% no tempo de atraso na entrega de mensagens do protocolo *Epidemic*, como pode ser visto na **figura 9**.

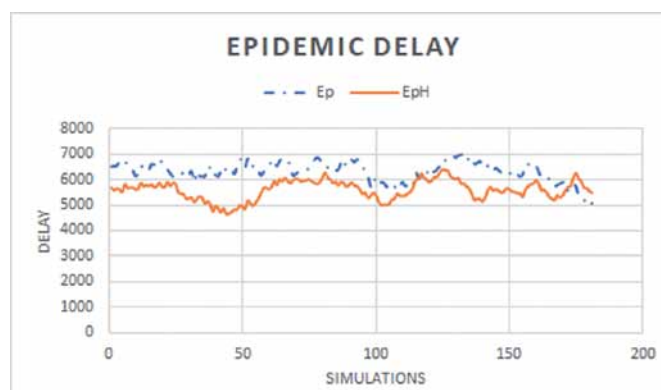


Fig. 9 – Cenário 2, comparação da média de atrasos do protocolo Epidemic com mensagens de 1000 bytes com e sem a influência dos helicópteros (EPH e EP, respectivamente).

No Cenário 2 foram realizadas simulações adicionais com a geração de 340 e 581 mensagens, porém mantendo-se o número total de 36 nós, sendo que 4 deles eram helicópteros. Os resultados das novas simulações podem ser vistos na **tabela 3**.

Tab. 3 – Cenário 2, resultados das simulações com a criação de 340 e 581 mensagens, respectivamente.

Protocol	N. Nodes	Size (bytes)	Helicopter	N. Messages	Av. Deliveries	"Av. Delays (Seconds) "
Epidemic	36	1000	Yes	340	220,62	6080,902
				581	360,85	6429,012
Direct Delivery	36	1000	Yes	340	57,325	5900,831
				581	97,88	5978,24
Spray And Wait	36	1000	Yes	340	174,355	6391,973
				581	360,3085	6424,89

De acordo com a **tabela 3**, 67% das mensagens foram entregues através do protocolo Epidemic, enquanto que o protocolo *Spray and Wait* enviou 53% e o *Direct Delivery* apenas 18% das 340 mensagens. Contudo, nas simulações com 581 mensagens, o *Epidemic* e o *Spray and Wait* apresentaram um empate em torno de 64% das mensagens entregues enquanto que o *Direct Delivery* se manteve com 18% das mensagens entregues.

4.1.3 Cenário 3

Como era esperado, aumentando a área do cenário e mantendo a mesma quantidade de nós, as taxas de mensagens entregues ao destinatário tendem a diminuir. Pois nesse cenário é maior o esparsamento entre os navios, diminuindo a probabilidade deles se encontrarem.

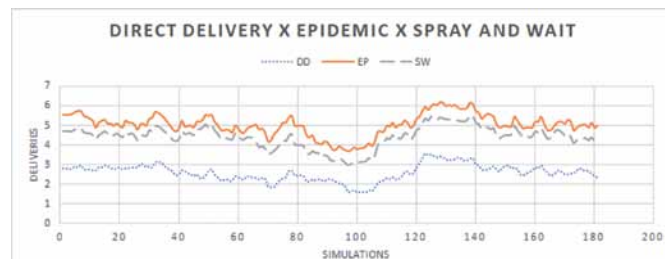
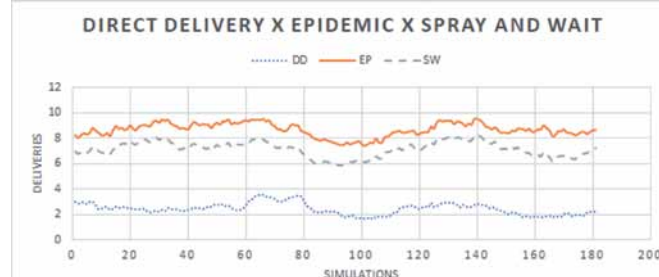
Para comprovar essa hipótese, no Cenário 3 foram realizadas simulações com 61 (25 novos nós). Os resultados da primeira simulação com 36 nós, 16 mensagens de tamanho variável de até 1000 bytes podem ser vistos na **tabela 4**.

Tab. 4 – Cenário 3, resultados das simulações com a criação de 16 mensagens.

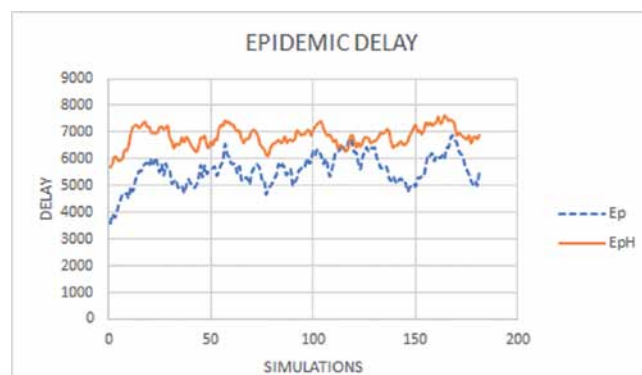
Protocol	N. Nodes	N. Messages	Size (bytes)	Helicopter	Av. Deliveries	"Av. Delays (Seconds) "
Epidemic	36	16	100	Not	5,05	5441,96
				Yes	8,65	6730,87
			1000	Not	5,05	5494,54
				Yes	8,625	6776,55
Direct Delivery	36	16	100	Not	2,57	5534,78
				Yes	2,455	5245,69
			1000	Not	2,57	5542,84
				Yes	2,455	5253,37
Spray And Wait	36	16	100	Not	4,415	5839,78
				Yes	7,135	6739,2
			1000	Not	4,41	5875,18
				Yes	7,125	6742,33

No Cenário 3, o protocolo *Epidemic* encaminhou cerca de 41.31% das mensagens, o protocolo *Spray and Wait* cerca de 34.83% e o *Direct Delivery* cerca de 15,81%. Isso mostrou

que mesmo com o esparsamento do Cenário 3, o protocolo *Epidemic* se manteve como o melhor encaminhador e isso pôde ser visualizado nas **figuras 10 e 11**.

**Fig. 10** – Cenário 3, Direct Delivery x Epidemic x Spray and Wait com entrega de mensagens de 1000 bytes, com helicópteros.**Fig. 11** – Cenário 3, Direct Delivery x Epidemic x Spray and Wait com entrega de mensagens de 1000 bytes, com helicópteros.

Os helicópteros contribuíram com um acréscimo de 22% na entrega de mensagens, no protocolo *Epidemic*. Contudo, o simulador acusou um aumento de 20% na média de atrasos na entrega de mensagens, como mostrado no gráfico na **figura 12**.

**Fig. 12** – Cenário 3, comparação da média de atrasos do protocolo Epidemic com mensagens de 1000 bytes com e sem a influência dos helicópteros (EPH e EP, respectivamente).

No entanto, uma explicação para esse aumento está na contabilização do tempo das mensagens entregues

no cenário com helicópteros. Ou seja, como essas mensagens não haviam sido entregues nas simulações sem helicópteros, o tempo de armazenamento delas, em buffer, foi desprezado pelo simulador no cálculo final. Dando uma falsa impressão de que houve uma queda de desempenho, quando na verdade mais mensagens conseguiram chegar ao destinatário final através dos helicópteros.

Por ser o cenário mais extenso, novas simulações foram realizadas com um número maior de navios e de mensagens no Cenário 3. A quantidade de nós variou de 36 para 61 navios e as mensagens variaram de 346 para 585. Os resultados dessas novas simulações podem ser visualizadas na **tabela 5**.

Tab. 5 – Cenário 3, resultado das simulações com a criação de 346/585 mensagens, com a participação de 36/61 nós.

Protocol	Size(bytes)	Helicopter	N. Nodes	N. Messages	Av. Deliveries	"Av. Delays (Seconds) "
Epidemic	1000	Yes	36	346	115,475	5856,344
				585	192,7	5967,81
			61	346	130,535	5228,19
				585	203,26	5545,29
Direct Delivery	1000	Yes	36	346	55,885	5754,15
				585	95,285	5789,01
			61	346	53,565	5483,66
				585	76,25	5188,21
Spray And Wait	1000	Yes	36	346	100,815	6002
				585	171,16	6017,44
			61	346	103,005	5790,32
				585	160,85	5870,83

Foi observado que quando aumentou-se o número de nós de 36 para 61, houve uma suave melhora de 4.21% na taxa de entrega das 346 mensagens criadas e de 2.81% na entrega das 585 mensagens criadas, no protocolo Epidemic. Com o aumento do número de nós na rede, os protocolos *Epidemic* e *Spray and Wait* apresentaram, mesmo pequena, uma melhoria de performance. Isso significa que esses novos nós, através da mobilidade [17], preencheram algumas das lacunas do novo cenário, permitindo que um número maior de mensagens pudessem chegar aos seus destinatários.

Apesar do bom desempenho alcançado pelo protocolo Epidemic em todos os cenários, a estratégia adotada para o encaminhamento de mensagens, deste protocolo, trouxe preocupações com questões de segurança [18],[19].

Sabe-se que as mensagens dos sistemas táticos

dos navios de guerra tramitam sempre em canais criptografados. Mesmo assim, pensando em dar continuidade ao estudo, deverá ser desenvolvido um módulo de segurança para o algoritmo do *Epidemic* [20],[21] no intuito de acrescentar mais uma camada de segurança para o trâmite de mensagens táticas em navios de guerra.

5. Conclusão

A arquitetura DTN é útil em ambientes onde não exista uma infraestrutura de redes fim-a-fim. A sua habilidade de alcançar os destinatários, através da mobilidade dos nós, faz com que a abordagem DTN seja elegível para preencher as lacunas deixadas pelas redes convencionais.

O número reduzido dos navios de combate em relação ao de embarcações civis (mercantes, pesqueiros etc), faz com que esses navios apresentem uma baixa densidade e estejam esparsamente distribuídos ao longo das grandes áreas das operações militares.

Os cenários marítimos dos navios de guerra possuem características que favorecem o uso de redes DTN, tais como: energia e armazenamento ilimitados, constantes conexões e desconexões e velocidades compatíveis que permitem contatos prolongados.

O protocolo *Epidemic* possui a capacidade de espalhar informação para o máximo número de nós possível, enquanto que o *Spray and Wait* impõe um tempo de espera entre uma inundação e outra. Por fim, o protocolo *Direct Delivery* não trabalha de forma colaborativa, representando a ausência de uma solução DTN em frente de um cenário desafiador.

Neste trabalho, o protocolo *Epidemic* demonstrou ter o melhor desempenho no cenário marítimo, quando comparado aos protocolos *Spray and Wait* e o *Direct Delivery*. Quanto maior a colaboração, maior a probabilidade de sucesso na entrega de mensagens aos destinatários finais.

Apesar do melhor desempenho do protocolo *Epidemic*, surgiu neste trabalho uma preocupação em relação à segurança desse protocolo, tendo em vista a grande quantidade de compartilhamentos executados por ele, podendo essa característica vir a

ser explorada por nós maliciosos.

Dessa forma, visando o aprimoramento da segurança do protocolo *Epidemic* no cenário marítimo, como trabalho futuro, deverá ser implementada uma técnica que auxilie o protocolo na seleção de conexões seguras. Essa ação permitiria conciliar a capacidade de disseminação do algoritmo do protocolo *Epidemic* com algum critério de segurança, de forma a diminuir

a possibilidade de compartilhamento de informações sigilosas com nós não autorizados.

Esse novo módulo representaria mais uma camada de segurança para comunicação de mensagens táticas entre navios de guerra, tendo em vista que tais mensagens não tramitam em texto claro, ou seja, utilizam canais criptografados.

Referências Bibliográficas

- [1] M. ZHOU, V. D. HOANG, H. HARADA, J. S. PATHMASUNTHARAM, H. WANG, P. KONG, C. ANG, Y. GE, AND S. WEN, "Triton: high-speed maritime wire-less mesh network," *IEEE Wireless Communications*, vol. 20, pp. 134–142, October 2013.
- [2] L. L. C. D. C. CHRYSOSTOMOU, "Applying delay tolerant networking routing algorithms in maritime communications in world of wireless mobile and multimedia networks (wowmom)," *IEEE 14th International Symposium and Workshops*, 2013.
- [3] P. KOLIOS AND L. LAMBRINOS, "Optimising file delivery in a maritime environment through inter-vessel connectivity predictions," *Cyprus University of Technology*, 2012.
- [4] A. KERANEN, J. OTT, AND T. KARKKAINEN, "The ONE Simulator for DTN Protocol Evaluation," in *SIMUTools '09: Proceedings of the 2nd International Conference on Simulation Tools and Techniques*, (New York, NY, USA), ICST, 2009.
- [5] A. G. H. A. V. FRIDERIKOS, K. PAPADAKI. M. DOHLER, "Linked Waters," *Communications Engineer*, Vol: 3, no: 2, Apr., 2005.
- [6] R. MOHSIN AND J. WOODS, "Performance Evaluation of MANET routing protocols in a maritime environment," in *2014 6th Computer Science and Electronic Engineering Conference (ceec)*, pp. 1–5, Sept 2014.
- [7] P. PURI AND M. P. SINGH, "A survey paper on routing in delay-tolerant networks," in *2013 International Conference on Information Systems and Computer Networks*, pp. 215–220, March 2013.
- [8] C. SAMPAIO GUSTAVO, C. SAMPAIO GUILHERME, SALLES RONALDO M.. Avaliação de algoritmos DTN para ambiente operacional tático, um estudo de caso do Esquadrão de Cavalaria Mecanizado. In: *Revista Militar de Ciência e Tecnologia (RMCT)*, 2019.
- [9] R. J. MOHSIN, J. WOODS, AND M. Q. SHAWKAT, "Density and mobility impact on manet routing protocols in a maritime environment," in *2015 Science and Information Conference (SAI)*, pp. 1046–1051, July 2015.
- [10] C. K. W. J. L. Y. K. YOUNGBUM, K. JONGHUN. W. YUPENG, "Application scenarios of nautical ad-hoc network for maritime communications," *IEEE OCEANS*, Oct., 2009.
- [11] D. H. JOB, M. A. N. SILVA, W. A. PINHEIRO, AND R. M. SALLES, "An architecture to implement the bundle layer function of delay tolerant networks," in *2013 V International Workshop on Telecommunications (IWT)*, May 2013.
- [12] J. OTT, D. KUTSCHER, AND C. DWERTMANN, "Integrating DTN and MANET routing," in *proceedings of the 2006 SIGCOMM Workshop on Challenged Networks*, CHANTS '06, (New York, NY, USA), pp. 221–228, ACM, 2006.
- [13] M. G. R. L. H. M. K. C. E. O. C. M. B. D. CARINA T. DE OLIVEIRA, MARCELO D. D. MOREIRA, "Redes Tolerantes a Atrasos e Desconexões," *Universidade Federal do Rio de Janeiro, Universidade do Estado do Rio de Janeiro*, 2007.
- [14] A. T. C. C. SILVA, "Redes tolerantes a atrasos, protocolos de disseminação e aplicações," *Universidade Federal do Rio de Janeiro, Universidade do Estado do Rio de Janeiro*, 2007.
- [15] M. A. R. S. MANGRULKAR, "Routing protocol for delay tolerant network: a survey and comparison," *2010 International Conference on Communication, Control and Computer Technologies*, 2010.

- [16] K. FALL AND S. FARRELL, "DTN: an architectural retrospective," *IEEE Journal on Selected areas In Communications*, vol. 26, pp. 828–836, June 2008.
- [17] F. LI AND J. Wu, "Mobility reduces uncertainty in manets," in *IEEE INFOCOM 2007 - 26th IEEE International Conference on Computer Communications*, pp. 1946–1954, May 2007.
- [18] F. LI, J. WU, and a. Srinivasan, "Thwarting blackhole attacks in disruption-tolerant networks using encounter tickets," in *IEEE INFOCOM 2009*, pp. 2428–2436, April 2009.
- [19] S. FARRELL AND V. CAHILL, "security considerations in space and delay tolerant networks," in *2nd IEEE International Conference on Space Mission Challenges for Information Technology (SMC-IT'06)*, pp. 8 pp.– 38, 2006.
- [20] J. BURGESS, G. D. BISSIAS, M. D. CORNER, AND B. N. LEVINE, "Surviving attacks on disruption-tolerant networks without authentication," in *Proceedings of the 8th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing, MobiHoc '07*, (New York, NY, USA), pp. 61–70, ACM, 2007.
- [21] A. KATE, G. M. ZAVERUCHA, AND U. HENGARTNER, "Anonymity and security in delay tolerant networks," in *2007 Third International Conference on Security and Privacy in Communications Networks and the Workshops- SecureComm 2007*, pp. 504–513, Sept 2007.

Implementação de um controle preditivo baseado em modelo adaptativo na otimização da trajetória de um veículo militar

Marcelo Andrés Acuña*, Gustavo Simão Rodrigues, Elias Dias Rossi Lopes

Instituto Militar de Engenharia

Praça General Tibúrcio, 80, 22290-270

Rio de Janeiro, RJ, Brasil

*marceloacuna@gmail.com

RESUMO: Este artigo apresenta uma técnica de otimização não linear, a fim de determinar a trajetória de um veículo militar durante o teste da manobra evasiva dupla, do inglês Double Lane Change Maneuver (DLCM) da Organização do Tratado do Atlântico Norte (OTAN). O veículo modelado é um caminhão de três eixos, sendo somente o primeiro eixo com rodas esterçantes. Este artigo também traz o modelo da dinâmica lateral durante a desaceleração longitudinal. O esquema da modelagem apresentado neste trabalho leva em consideração a estrutura de otimização do Controle Preditivo Baseado em Modelo Adaptativo (CPBMA), composto pela planta com mudanças dinâmicas, a trajetória de referência e a atualização da planta, todos integrados pelo controlador, aplicado para determinar o ângulo de esterçamentos das rodas diretrizes. O presente algoritmo é um método amplamente estudado e empregado nos projetos atuais de veículos autônomos, visando modelar o comportamento do motorista ao dirigir o veículo durante uma manobra exigente.

ABSTRACT: This article presents a non-linear optimization technique in order to determine the trajectory of a military vehicle during the Double Lane Change Maneuver (DLCM) of the North Atlantic Treaty Organization (NATO). The modeled vehicle is a three-axle truck, the first one with steering wheels. This article also presents the model of lateral dynamics during longitudinal deceleration. The modeling scheme presented in this work takes into account the optimization structure of Adaptive Model Predictive Control (AMPC), composed of the plant with dynamic changes, reference trajectory and plant update, all integrated by the controller, applied to determine the steering wheel angle. The present algorithm is a method widely studied and used in the current design of autonomous vehicles. The method aims to model the driver's behavior when driving the vehicle during a demanding maneuver.

PALAVRAS-CHAVE: Otimização. Veículo Autônomo. Desaceleração. DLCM. CPBMA.

KEYWORDS: Optimization. Autonomous Vehicle. Deceleration. DLCM. AMPC.

1. Introdução

Mais da metade das baixas na guerra ocorre quando os soldados entregam combustível, alimentos ou outros suprimentos em zonas de combate [1]. Os veículos autônomos militares vêm sendo recentemente o foco das pesquisas como solução ao problema sem por em risco as vidas dos soldados. Eles também são amplamente utilizados para outros fins, tanto industriais como pessoais. Esta máquina deve ser capaz de perceber o ambiente ao seu redor e navegar em conformidade, bem como usar sistemas de controle avançados e interpretar informações sensoriais para determinar rotas de navegação, além

de obstáculos e sinalização relevante. A proposta neste trabalho consiste na implementação de um controle preditivo baseado em modelo adaptativo (CPBMA), que faz com que o veículo percorra uma trajetória desejada, com um ângulo de guinada desejado, com variação da velocidade longitudinal, com restrições das variáveis físicas compostas pelo ângulo de esterçamento das rodas, pela velocidade de esterçamento das rodas e do deslocamento lateral, num determinado intervalo de valores. Para tornar isso possível, um algoritmo para otimizar a trajetória em cada tempo de amostragem é usado baseado no teste específico para viaturas militares de *Double Lane Change Maneuver* (DLCM) da Organização do Tratado do Atlântico Norte (OTAN) [2]-

[4]. Os resultados obtidos do comportamento dinâmico modelados no ambiente de MATLAB/Simulink® são comparados com o mesmo veículo configurado no programa truckSIM®.

2. Fundamentação teórica

A dinâmica veicular normalmente é dividida em três partes para seu estudo: dinâmica longitudinal, lateral e vertical. Muitos modelos matemáticos simplificados foram desenvolvidos para se aproximarem do comportamento de um veículo real nestas áreas, sem necessitar desenvolver o modelo completo em 3D. Entre muitas alternativas diferentes para modelar a dinâmica e a cinemática lateral do veículo, a abordagem do modelo da bicicleta com três rodas foi usada neste trabalho. O modelo plano de veículo rígido e sua interação com um CPBMA são empregados [5]-[13].

2.1 Dinâmica planar

Para este estudo, o veículo é representado pelo modelo da bicicleta com três rodas e 3 graus de liberdade (GDL) (**figura 1**). As forças longitudinal, F_x , e F_y lateral, são aplicadas nas rodas dianteira, intermediária e traseira. A velocidade longitudinal da roda esterçante dianteira, v_d , forma o ângulo de deslizamento, β_d , com o eixo longitudinal do veículo, cx . São estabelecidos três sistemas de coordenadas, o primeiro para a roda em relação ao

veículo, r_d , o segundo para o veículo, c , em relação ao último sistema que é o referencial global fixo, f . Assim a rotação do veículo no centro de massa (CM) no referencial fixo é chamada de ângulo de guinada, ψ e o ângulo entre a direção longitudinal da roda e o referencial do veículo é chamado de ângulo de esterçamento da roda, δ . Resultando entre na diferença de β_d e δ , chamado ângulo de desvio do pneu, α .

Para determinar a força lateral, F_y , no referencial da roda, quando ela é girada sob uma carga vertical, F_z , é considerado o ângulo de desvio, α , proporcional à força lateral, segundo a **equação 1**

$$F_y = -C_\alpha \alpha ; \alpha \leq 5^\circ \quad (1)$$

Onde C_α é a rigidez lateral do pneu (do inglês *cornering stiffness*). A rotação do eixo dianteiro está modelada usando a geometria Ackerman [3], pela **equação 2**.

$$\cot(\delta_{int}) - \cot(\delta_{ext}) = \frac{b_w}{L} \quad (2)$$

Onde δ_{int} e δ_{ext} são os ângulos de esterçamento da roda interna à curva e externa, respectivamente, b_w é a bitola e L a base de rodas (distância entre eixo dianteiro e o centro de ancoragem dos eixos traseiros).

Para a **figura 1** é aplicada a formulação segundo Newton-Euler no referencial da viatura no CM, obtendo-se as **equações 3**.

$$\begin{cases} \sum {}^c F_x = m_v \dot{v}_x - m_v v_y \dot{\psi} \\ \sum {}^c F_y = m_v \dot{v}_y + m_v v_x \dot{\psi} \\ \sum {}^c M_z = I_{zz} \ddot{\psi} \end{cases} \quad (3)$$

Onde m_v é a massa do veículo, I_{zz} é o momento de inércia do veículo no eixo vertical-z.

2.2 Trajetória desejada

A manobra evasiva dupla do tipo OTAN é essencialmente uma versão semelhante à especificada

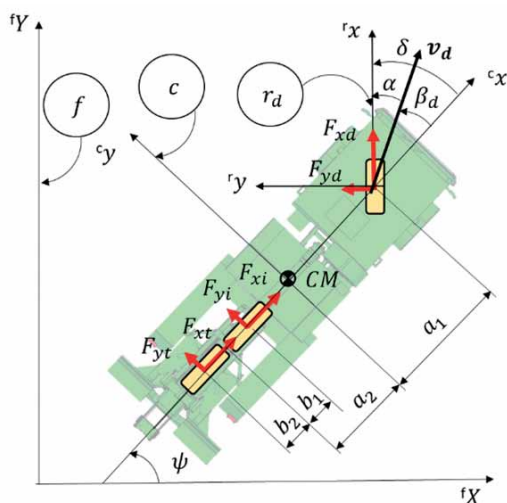


Fig. 1 – Modelo da bicicleta aplicado.

na ISO 3888-1 [6]. O veículo deve poder se mover lateralmente pelo menos 3,5 m e depois retornar à sua rota original. A distância da largura de entrada e saída de teste permanece constante, enquanto a ISO 3888-1 apresenta essa distância reduzida. A prova da OTAN visa refletir o esforço máximo de manobra de alta velocidade para veículos maiores e, por tanto, é proporcionalmente mais longo. Neste teste, o veículo entra na zona de provas com uma certa velocidade inicial e em seguida, o acelerador é liberado.

Segundo Blundell [7], o equacionamento da trajetória lateral numa manobra evasiva dupla para veículos militares [2] corresponde a uma função cosseno duplo, **equação 4**.

$${}^f Y_{d(fX)} = \frac{3,5 m}{2} [1 - \cos(fX \pi / (24 m + LG))] \quad (4)$$

Onde ${}^f Y_{(fX)}$ é a posição lateral do CM do veículo no referencial fixo, ${}^f X$ a posição longitudinal do CM do veículo no referencial fixo e L é o comprimento do veículo. Os parâmetros geométricos de largura e comprimento da pista de prova estão em função do comprimento e largura do veículo [2].

Outra referência é o ângulo de guinada desejado, ψ_d , definido pela seguinte equação **equação 5** [8].

$$\psi_{d(fX)} = L \kappa_{(fX)} = L \frac{{}^f \ddot{Y}_{(fX)}}{[{}^f \dot{Y}_{(fX)} + 1]^{2/3}} \quad (5)$$

Onde ${}^f \ddot{Y}_{(fX)}$ e ${}^f \dot{Y}_{(fX)}$ são, respectivamente, a segunda e primeira derivada da equação da trajetória do veículo, o arco da curva e L a base de rodas.

Para determinar as velocidades longitudinal e lateral das rodas no modelo de seis rodas é empregado o Teorema de Chasles para transformar as velocidades do sistema referencial do veículo às rodas em função do vetor posição da roda com origem no CM do veículo e extremo no centro de rotação da roda, r_n , sendo n o n.º de roda de 1-6 (**equação 6**). De esta maneira, pode-se determinar a posição de cada roda

no referencial fixo.

$$\{{}^f v_n\} = \{v_{CM}\} + \dot{\psi} \times r_n \quad (6)$$

3. Controle preditivo baseado em modelo adaptativo (CPBMA)

Na literatura existem muitos modelos de controle desenvolvidos para estabelecer o ângulo de esterçamento das rodas diretrizes no teste da DLCM, mas eles baseiam-se normalmente no veículo com velocidade longitudinal constante. Porém, o primeiro problema de planejamento do comportamento do motorista no esterçamento das rodas foi abordado na necessidade de atualizar permanentemente a formulação da trajetória desejada, o ângulo de guinada desejado e as equações da dinâmica planar em função da variação da velocidade em cada instante durante a desaceleração. No trabalho de [9] é apresentada a abordagem de emprego de um CPBMA para um robô manipulador de duas rodas com diferentes massas, o problema correspondente à seleção e colocação de objetos ou carga de um lugar para outro controlando a localização do CM de variação rápida do ângulo de gravidade do sistema modelado que não é linear.

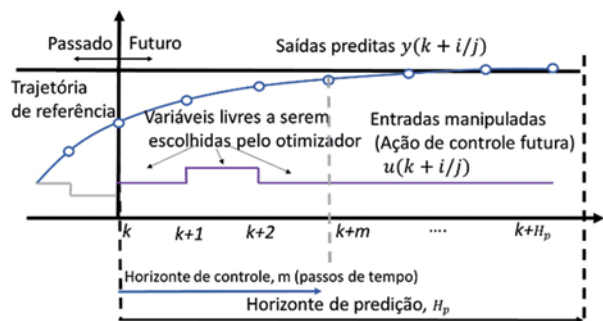


Fig. 2 – Esquema representativo de um controlador preditivo.

No presente trabalho, é utilizado um CPBMA, amplamente usado no setor de controle de processos. Ele depende da dinâmica do processo do sistema e leva o tempo atual em consideração, mantendo a otimização

em intervalos de tempo futuros, k (**figura 2**). Este é um método de otimização de horizonte temporal, p , iterativo e finito. O controlador alcança a previsão dos estados futuros do modelo linear invariável no tempo (MLIT) da planta não linear, em torno de pontos de equilíbrio específicos. Na prática, a previsão dos estados futuros permite a predição de erros futuros, u_k . O CPBMA usa a mudança de pontos operacionais para atualizar o modelo de previsão [10], [11].

Em relação à formulação é empregada a estratégia de espaços de estados:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= A x(k) + B u(k) + d \\ y &= C x(k) + D u(k) + v\end{aligned}\quad (7)$$

Onde x representa os estados, A , B , C e D são as matrizes de estado de entrada e saída, $u(k)$ a entrada da planta, y a saída da planta, d o ruído do processo representado pelos erros da modelagem, v a saída do ruído representado pela medição dos erros.

A predição e a função custo para o modelo do CPBMA é proposta e desenvolvida por Bemporad [12], transformada em um problema de otimização quadrático (PQ), escrevendo-se da seguinte forma:

$$\min_x (f^T x + \frac{1}{2} x^T H x) \quad , \quad Ax \leq b \quad (8)$$

Onde $x^T = [z^T \epsilon]$. Esta última equação representa as chamadas decisões do modelo, onde H é a matriz Hessiana, A é a matriz das restrições dos coeficientes lineares, b e f são vetores. Este procedimento pode ser empregado para funções dinâmicas da planta de sistemas não lineares. Devido à mudança dos parâmetros da planta, emprega-se o filtro Kalman para ajustar os ganhos das funções a serem linearizadas. As equações que representam o emprego de filtro são as seguintes [9]-[12]:

$$L_k = (A_k P_{k|k-1} C_{m,k}^T + N) (C_{m,k} P_{k|k-1} C_{m,k}^T + R)^{-1} \quad (9)$$

$$M_k = P_{k|k-1} (C_{m,k} P_{k|k-1} C_{m,k}^T + R)^{-1} \quad (10)$$

$$P_{k|k-1} = A_k P_{k|k-1} C_{m,k}^T - (A_k P_{k|k-1} C_{m,k}^T + N) L_k^T + Q \quad (11)$$

Onde L_k e M_k são as matrizes de ganho para cada intervalo para manter consistência com os valores atualizados do modelo da planta, Q , R e N são as matrizes de covariância constante, A_k e $C_{m,k}$ são matrizes do espaço de estado da entrada do controlador de estado, $P_{k|k-1}$ é o valor do estado estimado do erro da matriz de covariância no instante k , baseado na informação disponível no instante $k-1$.

O modelo da planta (veículo) está modelado partindo das **equações 3** e são:

$$\begin{bmatrix} \dot{y} \\ \dot{\psi} \\ \dot{\delta} \\ \dot{f}_Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & a_{13} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ a_{31} & 0 & a_{33} & 0 \\ 1 & v_x & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y \\ \psi \\ \delta \\ f_Y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{2C_\alpha}{m_v} \\ 0 \\ \frac{2C_\alpha a_1}{I_{zz}} \\ 0 \end{bmatrix} \delta \quad (12)$$

Onde:

$$a_{11} = -\frac{6C_\alpha}{m_v v_x} \quad (13)$$

$$a_{13} = -v_x - \frac{2C_\alpha [a_1 - (a_2 - b_1) - (a_2 + b_2)]}{m_v v_x} \quad (14)$$

$$a_{31} = -\frac{2C_\alpha [a_1 - (a_2 - b_1) - (a_2 + b_2)]}{I_{zz} v_x} \quad (15)$$

$$a_{33} = -\frac{2C_\alpha [a_1^2 + (a_2 - b_1)^2 + (a_2 + b_2)^2]}{I_{zz} v_x} \quad (16)$$

Nota-se que todos os pneus por serem iguais apresentam o mesmo valor de rigidez lateral, (**equação 1**).

4. Aplicação do CPBMA

A modelagem do comportamento do motorista leva em consideração a ação de tirar o pé do acelerador no início da pista de prova partindo de uma velocidade inicial de 10 m/s (36,6 km/h) e esterçar as rodas para evadir os obstáculos.

O esquema computacional desenvolvido em ambiente MATLAB/Simulink®, mediante diagramas de blocos, é

ilustrado na **figura 3**. Os elementos essenciais são a planta com mudança dinâmica (**equação 12**), a trajetória de referência (**equações 4 e 5**), o bloco atualização com as matrizes, A , B , C e D , atualizadas com a velocidade no instante de amostragem e o bloco CPBMA do controlador (sem ruído).

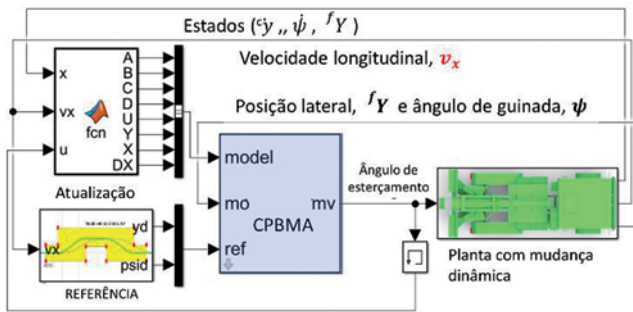


Fig. 3 – Diagrama de blocos do CPBMA no Simulink® [13].

As entradas do controlador são o deslocamento lateral desejado, fY_d , e o ângulo de guinada desejado, ψ_d , sendo a saída o ângulo de esterçamento, δ . No caso da planta, a entrada é o ângulo de esterçamento, δ , fornecido pelo controlador e suas saídas são a posição lateral, fY , e o ângulo de guinada, ψ . Para o caso em estudo, empregam-se restrições de variáveis físicas, com valores máximos e mínimos do ângulo de esterçamento da roda, δ , da velocidade de esterçamento das rodas, $\dot{\delta}$, e do deslocamento lateral, fY . No presente estudo é considerada uma relação de direção (1:1).

Os dados empregados para o controlador são apresentados na **tabela 1**.

Tab. 1 – Parâmetros do controlador

Parâmetros	Símbolo	Valor	Grandeza
Tempo de amostragem	T_s	0,015	s
Horizonte de predição	H_p	10	-
Horizonte de controle	m	2	-
Esterçamento volante mín.	δ_{min}	-30	°
Esterçamento volante máx.	δ_{max}	30	°
Vel. esterçamento volante mín.	$\dot{\delta}_{min}$	-0,5	°/s
Vel. esterçamento volante máx.	$\dot{\delta}_{max}$	0,5	°/s
Deslocam. lateral mín.	fY_{min}	-1,918	m
Deslocam. lateral máx.	fY_{max}	5,744	m
Ângulo de guinada mín.	ψ_{min}	-11,45	°
Ângulo de guinada máx.	ψ_{max}	11,45	°

5. Resultados

Como resultado parcial, a simulação alcançou uma trajetória do CM de veículo ótima; o deslocamento lateral tem um desvio de $\pm 0,15$ m da referência, ou seja, praticamente a mesma trajetória do truckSIM®. Considera-se que a simulação desenvolvida do veículo executando o teste da manobra evasiva dupla do tipo OTAN foi aprovada, passando todas as rodas dentro do limite, como mostra a **figura 4**.

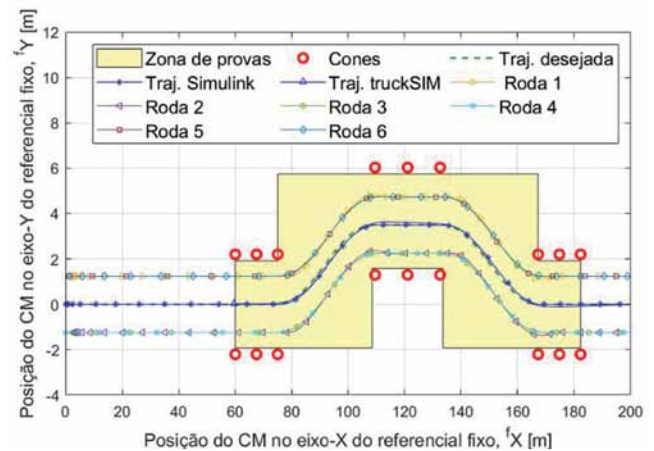


Fig. 4 – Trajetória otimizada.

A curva do ângulo de guinada, resultado da simulação, é bem próximo à referência, ($\pm 0,1$ °), sendo os valores picos de $+9,37$ ° e $-9,29$ °. Em comparação com os valores obtidos do truckSIM®, ele atinge valores de $8,57$ ° e $-8,45$ °, como é mostrado na **figura 5**.

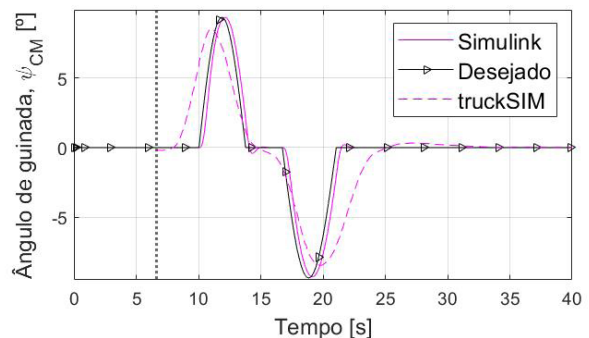


Fig. 5 – Comparação dos ângulos de guinada.

6. Conclusão

Pode-se concluir que o objetivo do presente

trabalho foi alcançado, obtendo-se a trajetória para o teste segundo a OTAN da manobra evasiva dupla para uma velocidade inicial de 10 m/s.

A implementação do Controle Preditivo Baseado em Modelo Adaptativo (CPBMA) demonstrou ser uma ferramenta confiável e eficiente na otimização da trajetória para o problema militar proposto, convergindo em resultados dentro dos valores admissíveis. Fica como principal sugestão para

trabalhos futuros a integração com um processador de imagens que detecte as linhas da estrada para transformá-las em entradas de referência do controlador.

Agradecimentos

Os autores agradecem a *VirtualCAE*, *Mechanical simulation™* e à Seção de Engenharia Mecânica do Instituto Militar de Engenharia.

Referências Bibliográficas

- [1] Pérez, H.; Xataka; <http://xataka.com>, acessada em março de 2020.
- [2] NATO; Performance – dynamic stability, International Staff Defense Support Division, AVTP 03-160W: Bruxelles, 1991, p. 1-11.
- [3] Acuña, M.A.; Simão Rodrigues, G.; Queiroz, R.V.G.; Lopes E.D.R.; Modeling and dynamic analysis of a 6 x 6 heavy military truck by adaptive model predictive control with application to NATO lane change test course, *Journal of Automobile Engineering*, SAGE Publication. 2020. <https://doi.org/10.1177/0954407020924156>.
- [4] Reinaldo, I.L.; Lopes, E.D.R.; Silva, R.R.R.M.; Montenegro, D.P.; Rodrigues, G.S.; Otimização de Parâmetros da Suspensão com base em Requisitos de Conforto e Estabilidade, XXVII Simpósio Internacional de Engenharia Automotiva. São Paulo, Blucher. 2019, p. 418-433. ISSN 2357-7592, doi 10.5151/simea2019-PAP36.
- [5] Jazar, R.N.; *Vehicle Dynamics Theory: and Application*, 2nd ed., Springer Science: New York, 2014, cap 2,10.
- [6] ISO 3888-1; Passenger cars – test track for severe lane-change maneuver – part I: Double lane-change, ISO: Genebra, 2002.
- [7] Blundell, M.; Harty, D.; *Multibody systems approach to vehicle dynamics*, [S.l.], Elsevier, 2004.
- [8] Jalali, K.; Uchida, T.; McPhee, J.; Steve, J; Steve, L.; Development of an advanced fuzzy active steering controller and a novel method to tune the fuzzy controller; SAE International. 2013, 245.
- [9] Önköl, M.; Kasnakoğlu, C.; Adaptive model predictive control of a two-wheeled robot manipulator with varying mass; *Measurement and Control*, SAGE Publications. 2018, v. 51, n. 1-2, p. 38–56.
- [10] MATLAB; Understanding Model Predictive Control, Part 1: Why Use MPC?; 06 mai. 2018; <https://www.youtube.com/watch?v=8U0xiOkDcmw>, acessada em fevereiro de 2020.
- [11] MATLAB; Understanding Model Predictive Control, Part 2: What is MPC?; 06 mai. 2018; <https://www.youtube.com/watch?v=cEWnixjNdzs&t=1s>, acessada em fevereiro de 2020.
- [12] Bemporad, A.; Morari, M.; Ricker, N. L.; *Model predictive control toolbox user's guide*. The mathworks, EUA, 2010.
- [13] MATLAB; Understanding Model Predictive Control, Part 6: How to Design an MPC Controller with Simulink; 06 mai. 2018; <https://www.youtube.com/watch?v=cEWnixjNdzs&t=1s>, acessada em fevereiro de 2020.

Propriedades magnéticas de ferritas mistas MnZnFeO_4 e MnAlFeO_4 : um estudo comparativo

R S de Biasi^{a*}, G B M Melo^b, M Torquato^a, D G Carvalho^c, M L N Grillo^d, A B S Figueiredo^a

^a Seção de Engenharia de Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

^b Programa de Apoio Técnico às Atividades de Ensino, Pesquisa e Extensão, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

^c Instituto Tocantinense Presidente Antônio Carlos, Araguaína, TO, Brasil

^d Instituto de Física, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, RJ, Brasil

*rsbiasi@ime.eb.br

RESUMO: Partículas nanométricas de $\text{Mn}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$, em que $0 \leq x \leq 1$, e $\text{MnAl}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$, em que $0 \leq x \leq 2$, foram sintetizadas pelo método sol-gel/combustão e as propriedades magnéticas desses compostos foram investigadas e comparadas. A magnetização de saturação das amostras de $\text{Mn}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ foi obtida na literatura e a magnetização de saturação das amostras de $\text{MnAl}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$ foi estimada a partir da distribuição catiônica; espectros de ressonância ferromagnética foram usados para determinar a anisotropia magnetocristalina. Os resultados mostraram que a magnetização de saturação e a anisotropia magnetocristalina das ferritas mistas MnZnFeO_4 e MnAlFeO_4 variam muito com as concentrações de Zn e Al, respectivamente, um resultado que pode ser útil para aplicações práticas desses materiais.

ABSTRACT: Nanosized particles of $\text{Mn}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$, where $0 \leq x \leq 1$, and $\text{MnAl}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$, where $0 \leq x \leq 2$, were synthesized by the sol-gel combustion method and the magnetic properties of these compounds were investigated and compared. The saturation magnetization of the samples of $\text{Mn}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ was taken from the literature and the saturation magnetization of the samples of $\text{MnAl}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$ was estimated from the cation distribution; ferromagnetic resonance spectra were used to determine the magnetocrystalline anisotropy. The results show that the saturation magnetization and the magnetocrystalline anisotropy of the mixed ferrites MnZnFeO_4 and MnAlFeO_4 vary over a wide range with Zn and Al concentrations, a result that could be useful for practical applications of these materials.

PALAVRAS-CHAVE: Processo sol-gel. Nanopartículas. Ferritas. Propriedades magnéticas.

KEYWORDS: Sol-gel process. Nanoparticles. Ferrites. Magnetic properties.

1. Introdução

A ferrita de manganês (MnFe_2O_4) é um material cerâmico com a estrutura cristalina do mineral espinélio (MgAl_2O_4) que, na forma nanométrica, tem sido muito estudado nos últimos anos devido ao grande número de aplicações, como gravação magnética, absorção de micro-ondas e administração de medicamentos [1]. As propriedades magnéticas da ferrita de manganês pura podem não ser as ideais para certas aplicações, mas elas podem ser modificadas substituindo parte dos íons Mn^{2+} por outro íon divalente ou parte dos íons Fe^{3+} por outro íon trivalente. Neste trabalho,

usamos medidas de ressonância magnética, dados da literatura e cálculos teóricos para determinar, usando íons divalentes e trivalentes típicos, quais são os valores de magnetização e anisotropia magnetocristalina é possível obter com essas misturas.

2. Método experimental

2.1 Preparação das amostras

O método de preparação das amostras foi o mesmo da referência [2]. As matérias-primas foram $\text{Mn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ e $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ de alta pureza. Dois conjuntos de amostras

foram preparados: um de ferritas mistas de Mn e Zn, de composição $Mn_{1-x}Zn_xFe_2O_4$, em que $x = 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8$ e $1,0$, e outro de composição $MnAl_xFe_{2-x}O_4$, em que $x = 0; 0,4; 0,8; 1,2; 1,6$ e $2,0$.

2.2 Medidas

O equipamento utilizado para executar as medidas de difração de raios X (DRX) e ressonância ferromagnética (RFM) foi o mesmo da referência [3].

3. Resultados

3.1 Medidas de difração de raios X

O objetivo das medidas de difração de raios X foi assegurar que as amostras continham apenas a fase cristalina desejada.

De acordo com os difratogramas, todas as amostras continham apenas uma fase, com os picos característicos da estrutura de espinélio das ferritas cúbicas. Um difratograma representativo, o da ferrita mista $MnAl_{1,2}Fe_{0,8}O_4$, é mostrado na **figura 1**. Os tamanhos médios de cristalito, mostrados na **tabela 1**, foram estimados usando o método descrito na referência [4]. O fato de que não existe uma variação regular do tamanho de cristalito com as concentrações de zinco e alumínio provavelmente é uma característica intrínseca do método de sol-gel/combustão. A falta de controle da temperatura durante o processo de combustão pode levar a uma dispersão significativa dos tamanhos de cristalito. Entretanto, as conclusões do presente trabalho não foram afetadas por essa dispersão.

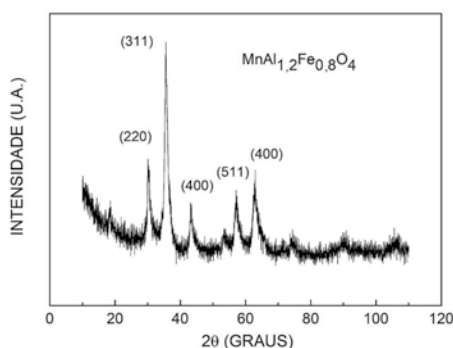


Fig. 1 – Difratograma de raios X de uma amostra de $MnAl_{1,2}Fe_{0,8}O_4$.

Tab 1 – TAMANHOS MÉDIOS DE CRISTALITO DE NANOPARTÍCULAS DE $Mn_{1-x}Zn_xFe_2O_4$ E $MnAl_xFe_{2-x}O_4$.

Fração de Zn	d (nm)	Fração de Al	d (nm)
0,0	7	0,0	7
0,2	6	0,4	19
0,4	3	0,8	10
0,6	6	1,2	11
0,8	5	1,6	10
1,0	8	2,0	17

3.2 Medidas de ressonância magnética

Os espectros de ressonância magnética das amostras dopadas com Zn e com Al são mostrados, respectivamente, nas **figuras 2 e 3**. As variações da largura de linha com a concentração de Zn e de Al são mostradas, respectivamente, nas **figuras 4 e 5**. No caso das amostras dopadas com Zn, os resultados estão em boa concordância com os obtidos por Prasad et al. [5] e por Deepty et al. [6]. Os campos de anisotropia correspondentes, H_a , foram determinados usando a relação proposta por Griscom [7], $H_a = 3\Delta H_{pp}/5$, e o fato de que a parte de baixo campo do espectro é mais larga que a parte de alto campo quando H_a é positivo e mais estreita quando H_a é negativo. Os resultados são mostrados nas **tabelas 2 e 3**.

Tab. 2 – Parâmetros Magnéticos de Nanopartículas de $Mn_{1-x}Zn_xFe_2O_4$.

Fração de Zn	ΔH_{pp} (T)	H_a (T)	M_s (MA/m)	K (MJ/m ³)
0,0	0,111	0,067	0,333	0,140
0,2	0,187	0,112	0,217	0,153
0,4	0,138	-0,083	0,180	0,094
0,6	0,104	-0,062	0,108	-0,042
0,8	0,094	-0,056	0,030	-0,011
1,0	0,040	-0,024	0,019	-0,03

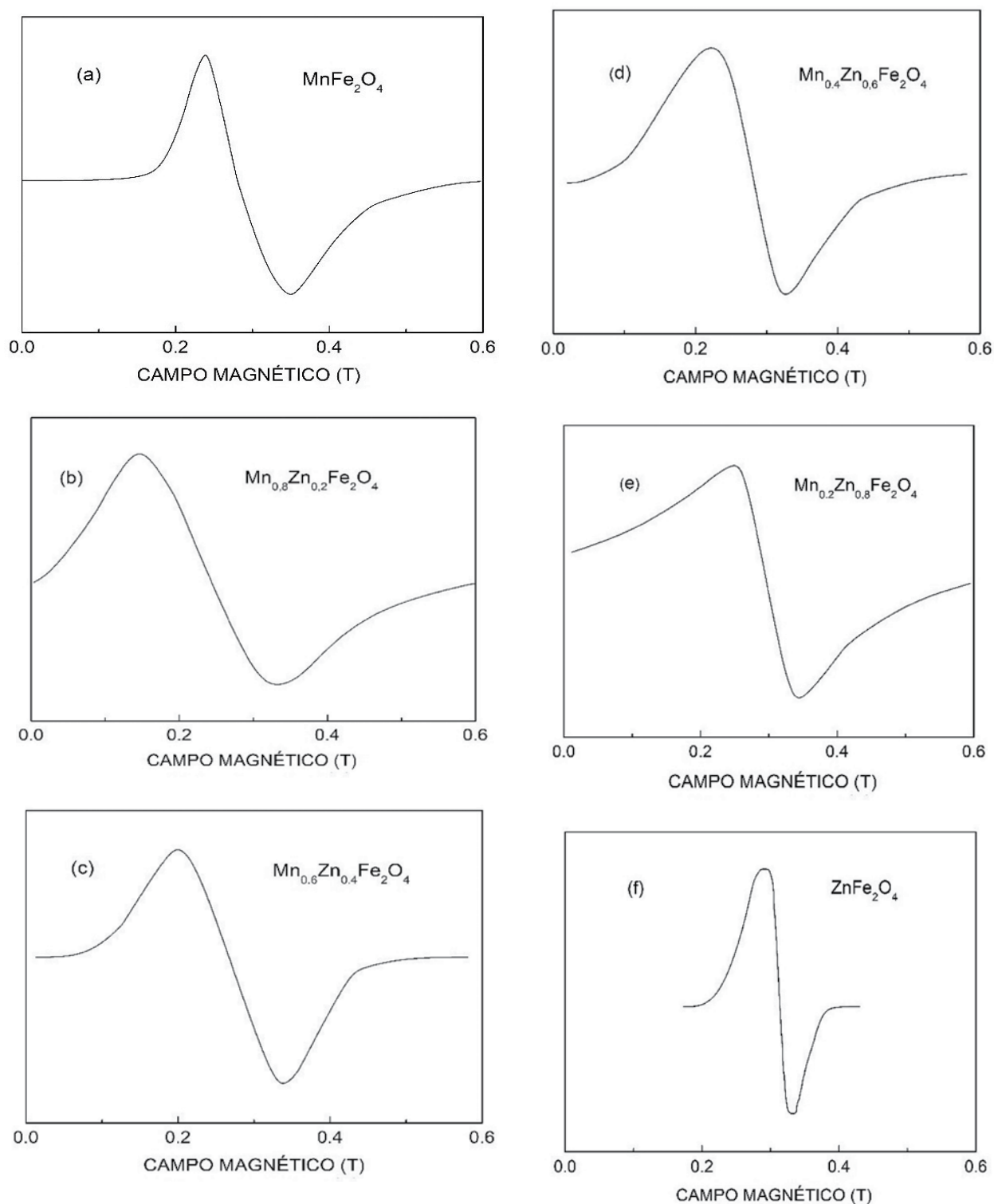


Fig. 2 – Espectros de ressonância de $\text{Mn}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ para vários valores de x . (a) MnFe_2O_4 ; (b) $\text{Mn}_{0.8}\text{Zn}_{0.2}\text{Fe}_2\text{O}_4$; (c) $\text{Mn}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{Fe}_2\text{O}_4$; (d) $\text{Mn}_{0.4}\text{Zn}_{0.6}\text{Fe}_2\text{O}_4$; (e) $\text{Mn}_{0.2}\text{Zn}_{0.8}\text{Fe}_2\text{O}_4$; (f) ZnFe_2O_4 .

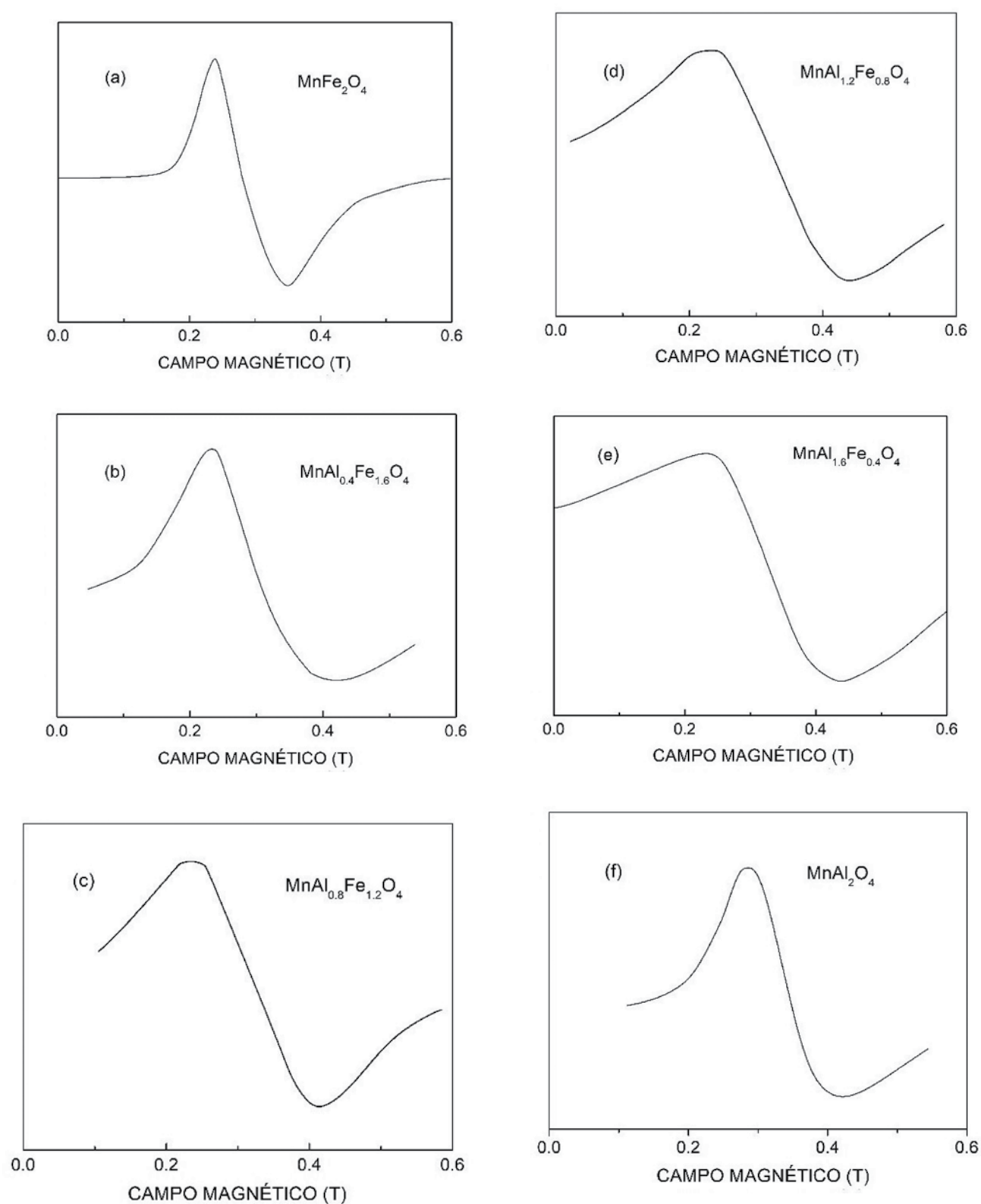


Fig. 3 – Espectros de ressonância de $\text{MnAl}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$ para vários valores de x . (a) MnAl_2O_4 ; (b) $\text{MnAl}_{0.4}\text{Fe}_{1.6}\text{O}_4$; (c) $\text{MnAl}_{0.8}\text{Fe}_{1.2}\text{O}_4$; (d) $\text{MnAl}_{1.2}\text{Fe}_{0.8}\text{O}_4$; (e) $\text{MnAl}_{1.6}\text{Fe}_{0.4}\text{O}_4$; (f) MnAl_2O_4 .

3.3 Magnetização de saturação

A magnetização de saturação das nanopartículas de $Mn_{1-x}Zn_xFe_2O_4$ foi calculada convertendo os valores relatados por Padmpriya et al [8] de emu/g para MA/m supondo uma massa específica de 5 g/cm^3 para todas as amostras. Os resultados são mostrados na **tabela 2**.

No caso das nanopartículas de $MnAl_xFe_{2-x}O_4$, os dados de magnetização de saturação foram estimados, como na referência [9], supondo que a distribuição dos cátions Mn^{2+} e Fe^{3+} e a constante de rede variam linearmente com a fração de Al^{3+} . O cálculo é simples e os detalhes não serão repetidos neste trabalho, a não ser para observar que as distribuições catiônicas e as constantes de rede usadas nos cálculos foram $(Mn_{0,64}Fe_{0,36})[Mn_{0,36}Fe_{0,64}]$ e $0,848\text{ nm}$ para $MnFe_2O_4$ [10] e $(Mn_{0,90}Al_{0,10})[Mn_{0,10}Al_{0,90}]$ e $0,821\text{ nm}$ para $MnAl_2O_4$ [11]. O fator usado para determinar a magnetização de saturação a 300 K a partir da magnetização de saturação a 0 K foi calculado comparando a saturação estimada a 0 K para $x = 0$ com o valor experimental relatado na referência [8]. O resultado é a **equação 1**:

$$M_s(x) = \left| \frac{0,183x - 0,203}{(0,848 - 0,014x)^3} \right| \text{ MA/m} \quad (1)$$

Os valores de M_s calculados para $x = 0; 0,4; 0,8; 1,2; 1,6$ e $2,0$ usando a **equação 1** são mostrados na **tabela 3**.

4. Discussão

Os valores dos parâmetros magnéticos magnetização de saturação M_s e anisotropia magnetocristalina K para nanopartículas das ferritas mistas $MnZnFeO_4$ e $MnAlFeO_4$ são comparados nas **figuras 6 e 7**. Como se pode ver na **figura 6**, as faixas de valores de magnetização que é possível obter misturando $MnFe_2O_4$ com Zn ou Al são praticamente iguais. Por outro lado, como mostra a **figura 7**, a mistura com Zn produz uma faixa maior de valores da anisotropia magnetocristalina que a mistura com Al . Vale a pena mencionar que esses parâmetros magnéticos não podem ser ajustados separadamente, já que a dopagem afeta simultaneamente os valores dos dois

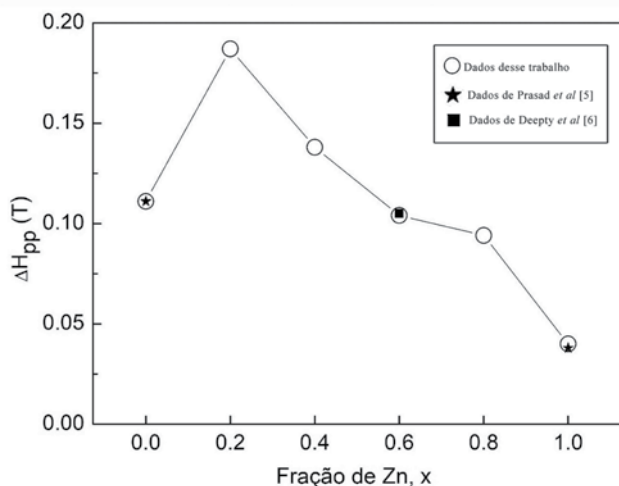


Fig. 4 – Largura de linha pico-a-pico de amostras de $Mn_{1-x}Zn_xFe_2O_4$. As retas são apenas guias para os olhos.

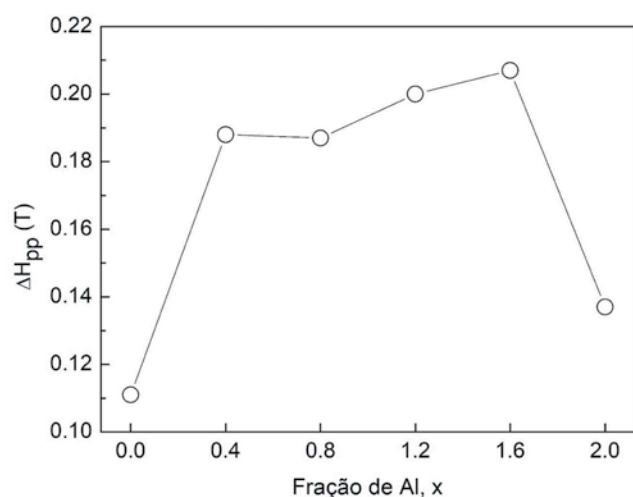


Fig. 5 – Largura de linha pico-a-pico de amostras de $MnAl_xFe_{2-x}O_4$. As retas são apenas guias para os olhos.

Tab. 3 – Parâmetros Magnéticos de Nanopartículas de $MnAl_xFe_{2-x}O_4$

Fração de Al	ΔH_{pp} (T)	H_a (T)	M_s (MA/m)	K (MJ/m ³)
0,0	0,111	0,067	0,333	0,140
0,2	0,188	0,113	0,217	0,154
0,4	0,187	0,112	0,097	0,068
0,6	0,200	0,120	0,029	0,022
0,8	0,207	0,124	0,160	0,125
1,0	0,137	0,082	0,296	0,153

parâmetros. Nas aplicações em que os dois parâmetros são importantes, as **figuras 8 e 9**, nas quais os valores de M_s e K são plotados no mesmo gráfico em função das concentrações de Zn e Al, respectivamente, permitem uma visão mais clara das possibilidades. Um usuário em potencial pode recorrer a esses gráficos para escolher o dopante e a concentração que oferecem a combinação de propriedades mais adequada para a aplicação desejada.

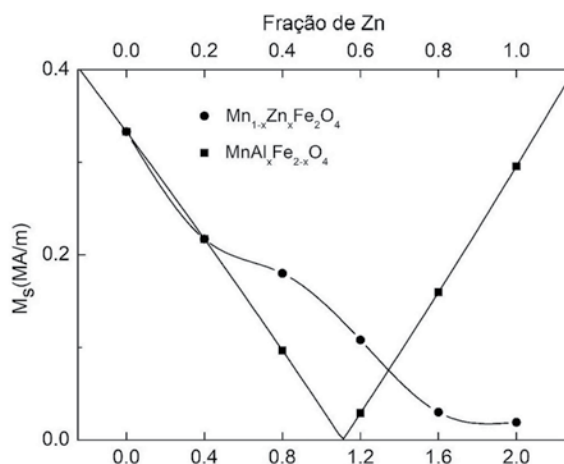


Fig. 6 – Magnetização de saturação das ferritas mistas $MnZnFeO_4$ e $MnAlFeO_4$ em função da fração dos dopantes.

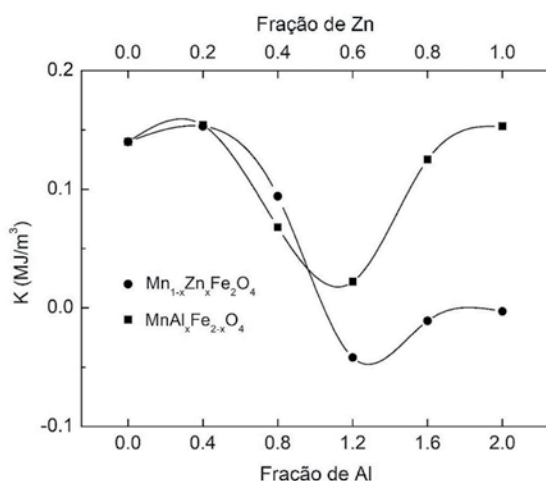


Fig. 7 – Anisotropia cristalina das ferritas mistas $MnZnFeO_4$ e $MnAlFeO_4$ em função da fração dos dopantes.

4. Conclusões

Nanopartículas de ferrita de Mn ($MnFe_2O_4$), em que os íons Mn^{2+} são substituídos por íons Zn^{2+} ou os íons Fe^{3+} são substituídos por Al^{3+} , foram preparadas

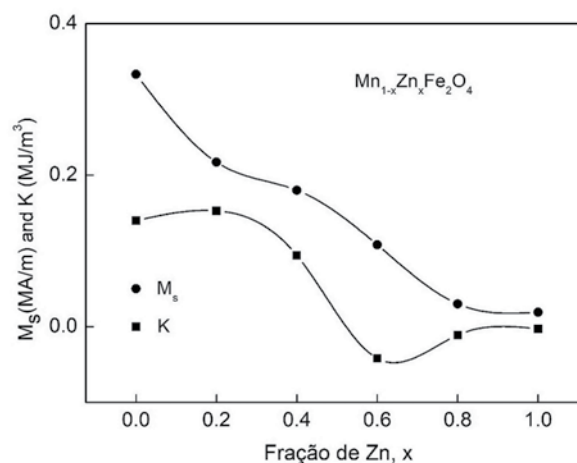


Fig. 8 – Magnetização de saturação e anisotropia magnetocristalina da ferrita mista $MnZnFeO_4$ em função da fração de Zn.

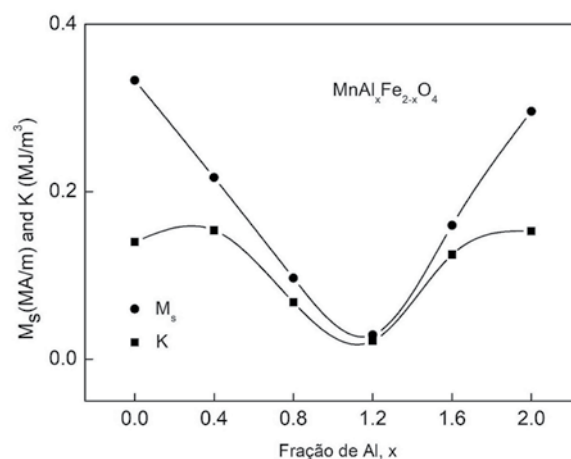


Fig. 9 – Magnetização de saturação e anisotropia magnetocristalina da ferrita mista $MnAlFeO_4$ em função da fração de Al.

diferentes concentrações desses íons e as propriedades magnéticas das ferritas mistas foram determinadas e comparadas.

Os resultados mostraram que substituir Mn por Zn ou Fe por Al pode mudar significativamente a magnetização de saturação e a anisotropia magnetocristalina da ferrita de manganês. Os resultados deste trabalho podem ser usados para ajustar as propriedades magnéticas de ferritas à base de manganês para aplicações específicas.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq e à CAPES pelo apoio financeiro.

Referências Bibliográficas

- [1] K. Zipare, J. Dhumal, S. Bandgar, V. Mathe e G. Shahane, Superparamagnetic Manganese Ferrite Nanoparticles: Synthesis and Magnetic Properties, *J. Nanosci.Nanoeng.* 1 (2015) 178.
- [2] R.S. de Biasi e L.H.G. Cardoso, A simple model for the magnetocrystalline anisotropy in mixed ferrite nanoparticles, *Physica B* 407 (2012) 3893.
- [3] R.S. de Biasi e H.F. Santos, Cation distribution, saturation magnetization and magnetocrystalline anisotropy of mixed ferrite $\text{NiAl}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$ nanoparticles, *Ceram. Int.* 43 (2017) 4557.
- [4] R.S.de Biasi e R.D.S. Lopes, Magnetocrystalline anisotropy of $\text{NiCoFe}_2\text{O}_4$ nanoparticles, *Ceram. Int.* 42 (2016) 9315.
- [5] S.A.V. Prasad, M. Deepty, P.N. Ramesh, G. Prasad, K. Srinivasarao, Ch. Srinivas, K. Vijaya Babu, E. Ranjith Kumar, N. Krishna Mohan e D.L. Sastry, Synthesis of MFe_2O_4 ($\text{M}=\text{Mg}^{2+}$, Zn^{2+} , Mn^{2+}) spinel ferrites and their structural, elastic and electron magnetic resonance properties, *Ceram. Int.* 44 (2018) 10517.
- [6] M. Deepty, Ch. Srinivas, K.V. Babu, E.R. Kumar, S.S. Meena, C.L. Prajapat, N.K. Mohang e D.L. Sastry, Structural and electron spin resonance spectroscopic studies of $\text{MnxZn}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ($x=0.5, 0.6, 0.7$) nanoferrites synthesized by sol-gel auto combustion method, *J. Magn. Magn. Mat.* 466 (2018) 60.
- [7] D.L. Griscom, Ferromagnetic resonance of precipitated phases in natural glasses, *J. Non-Cryst. Solids* 67 (1984) 81.
- [8] G. Padmapriya, A. Manikandan, V. Krishnasamy, S.K. Jaganathan e S.A. Antony, Enhanced Catalytic Activity and Magnetic Properties of Spinel $\text{MnxZn}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ($0.0 \leq x \leq 1.0$) Nano-Photocatalysts by Microwave Irradiation Route, *J. Supercond. Nov. Magn.* 29 (2016) 2141.
- [9] G.B.M. Melo, M.L.N. Grillo and R.S. de Biasi, Synthesis and magnetic properties of $\text{CoAlFe}_2\text{O}_4$ nanoparticles, *Ceram. Int.* 44 (2018) 22744.
- [10] S.M. Attia, Study of Cation Distribution of Mn-Zn Ferrites, *Egypt. J. Solids* 29 (2006) 329.
- [11] U. Hålenius, F. Bosi e H. Skogby, Galaxite, MnAl_2O_4 , a spectroscopic standard for tetrahedrally coordinated Mn^{2+} in oxygen-based mineral structures, *Am. Mineral.* 92 (2007) 1225.

Compósito de alumina e polietileno de baixa densidade, uma alternativa de aplicação em proteção balística

Márcio J Oliveira^{a,b}, Alaelson Vieira Gomes^a, André Rocha Pimenta^b

^a Instituto Militar de Engenharia (IME)

Praça General Tibúrcio, 80, 22290-270,

Praia Vermelha, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

^b LISComp, Instituto Federal do Rio de Janeiro, Paracambi, Brasil

*alaelson@ime.cb.br

RESUMO: Este trabalho apresenta um compósito, formado por alumina e polietileno de baixa densidade, para utilização em proteções balísticas, principalmente coletes. O material foi fabricado com 70% em peso de alumina e 30% em peso de polietileno de baixa densidade e submetido a testes balísticos e caracterizações físicas e térmicas. Após o ensaio balístico, a superfície de fratura foi caracterizada por microscopia eletrônica de varredura. Os resultados indicaram que uma placa de 15 mm do compósito é capaz de resistir de forma adequada a impactos balísticos de projéteis .22 LR. O compósito apresentou baixa absorção de água, suportou altas temperaturas e demonstrou boa estabilidade térmica. Contudo, apesar de aumentar o tempo de propagação de chama do polietileno, a adição de alumina não foi capaz de conferir propriedade de auto extinção de chama. Conclui-se que o compósito possui bom desempenho para proteções balísticas de projéteis .22 LR.

PALAVRAS-CHAVE: Proteção balística. Impacto balístico. Compósito alumina-PEBD.

ABSTRACT: This work presents a composite formed by alumina and low density polyethylene for use in ballistic protections, mainly bulletproof vests. The material was manufactured with 70% by weight of alumina and 30% by weight of low density polyethylene and subjected to ballistic tests and physical and thermal characterizations. After the ballistic test the fractured surface was characterized by scanning electron microscopy. The results indicated that a 15 mm composite board was able to satisfactorily withstand the ballistic impacts of .22 LR projectiles. The composite showed low water absorption, endured high temperatures and demonstrated good thermal stability. However, despite increasing the flame propagation time of polyethylene, the addition of alumina was not able to confer flame self-extinguishing properties. It is concluded that the composite has a good performance for ballistic protections of projectiles .22 LR.

KEYWORDS: Ballistic shielding. Ballistic impact. Alumina-LDPE composite..

1. Introdução

Não apenas no Brasil, mas ao redor do mundo, a segurança pessoal é uma preocupação crescente na sociedade atual, e se justifica por inúmeros motivos: intensificação de conflitos armados, atividades terroristas, aumento do poder de fogo dos armamentos, e a disponibilidade de armas para pessoas a margem da lei. Os números do setor de segurança no Brasil impressionam pela alta letalidade. Em 2018, o país teve um policial assassinado por dia, e mais de 119.000 apreensões de armas [1]. Em uma pesquisa realizada com 145 países, o Brasil ocupa o primeiro lugar como a nação com o maior número de pessoas mortas por arma de fogo [2].

Todos esses fatores estimulam o desenvolvimento de pesquisas na área de segurança, setor que foi inclusive contemplado com dois editais para apoio à projetos de pesquisa, um pela Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro - FAPERJ (Edital 07/2018) e outro pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES (Edital 15/2019), demonstrando a preocupação com o desenvolvimento de novas tecnologias voltadas para segurança.

Em especial as pesquisas em coletes para proteção balística, que visam a proteção pessoal dos agentes de segurança pública, são objetos de diversos estudos nos últimos anos [3–11]. Dependendo da tecnologia

utilizada, os coletes podem ser fabricados em apenas uma camada, ou em múltiplas camadas. Nos coletes multicamadas, uma camada é de material cerâmico, que devido a sua elevada dureza recebe a função de fragmentar a ponta do projétil, além de distribuir a energia do impacto sobre uma área maior [12–14]. Associada à camada cerâmica são utilizadas outras camadas de materiais metálicos ou poliméricos, que possuem maior tenacidade [8].

Atualmente, muitos sistemas de coletes multicamadas utilizam o Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular (UHMWPE) na forma de fibras, que possui baixa densidade e alta tenacidade [15]. Contudo, esse material apresenta desvantagens, quando comparados com outros tipos de polietilenos, pois apresentam custo mais elevado e não podem ser processados por métodos convencionais. Métodos de fabricação como injeção, sopro e extrusão são largamente aplicados em polímeros e possuem grande disponibilidade de equipamentos nas indústrias, contudo o UHMWPE não pode ser processado por esses métodos, demandando processos especiais como compressão a quente, extrusão por pistão hidráulico (RAM) e sinterização [13]. Uma proposta de substituição ao UHMWPE é o Polietileno de Baixa Densidade (PEBD), que é facilmente processado por todos os métodos convencionais, possui elevada resistência ao impacto, estabilidade dimensional, boa tenacidade e custo mais baixo [16].

Acerca das cerâmicas, a alumina (Al_2O_3) é a mais comumente aplicada em sistemas de blindagem, devido principalmente ao seu baixo custo. Entretanto, possui pior desempenho balístico quando comparada ao concreto de silício e concreto de boro, por exemplo. A densidade da alumina também é um fator limitador, restringindo sua aplicação em coletes, onde a mobilidade é necessária [3]. Estudo realizado por Silva e colaboradores [7] comprovaram o bom desempenho da alumina sinterizada, com 93 a 99 % em peso, em testes de impactos balísticos com altos níveis de energia. Contudo, é sabido que a utilização de materiais cerâmicos, em proporções muito altas, apresenta a grande desvantagem de não resistirem a disparos sucessivos muito próximos [4,12,16].

Os materiais cerâmicos possuem em seu interior diversas trincas e poros, descontinuidades decorrentes dos processos de fabricação empregados atualmente. Apesar de intensas pesquisas no setor, ainda não existe tecnologia disponível para eliminar essas descontinuidades. A presença delas e a fragilidade dos materiais cerâmicos podem resultar em falhas catastróficas quando submetidos a esforços de impacto. Esses motivos levaram a utilização de compósitos unindo as cerâmicas a polietilenos, esperando-se que o polímero promova ao compósito a tenacidade necessária para suportar disparos sucessivos [6,12].

Considerando os problemas apresentados, este trabalho tem por objetivo propor um novo compósito para aplicação balística, formado por alumina e PEBD. Foram analisadas propriedades mecânicas, térmicas e resistência balística do compósito proposto.

2. Materiais e métodos

Diversas técnicas de caracterização de materiais foram empregadas para identificar as propriedades do compósito de PEBD e alumina, proposto neste projeto para ser utilizado em aplicações balísticas. Algumas técnicas apresentam resultados importantes para a aplicação do produto, já outras, se demonstraram ineficazes para caracterização de compósito para proteção balística.

Com objetivo de criar um parâmetro de comparação, que por vezes era indisponível na literatura, alguns ensaios de caracterização foram realizados com o polímero PEBD puro.

2.1 Compósito

O compósito foi fabricado utilizando a alumina Alundum RR (A-620) e o PEBD Resinótipo RP 0065-000, contendo 70% de alumina e 30% de PEBD. Os materiais foram misturados em um agitador mecânico por 10 minutos para homogeneizar a distribuições dos pós. Em uma prensa com sistema de aquecimento (Solab – modelo SL-11) a mistura foi colocada no molde, aquecida até 270°C, e submetida ao seguinte ciclo de cargas, com duração total de 12 minutos: 1 tonelada por 4 min; 3 toneladas por 4 min;

5 toneladas por 4 min.

Dois tipos de moldes foram utilizados para fabricação dos compósitos, de acordo com o ensaio a ser executado: corpos de prova para ensaio de flamabilidade, medindo 12,7 x 5 x 127 mm; e discos com 51 mm de diâmetro e 15 mm de espessura para os demais ensaios e testes.

2.2 Ensaio balístico

Os ensaios balísticos foram realizados em um provete de ar comprimido (Gunpower – modelo SSS) com dois cilindros comunicantes, um com capacidade de 0,5L e outro de 6L, com pressão estimada de 280 bar e projétil de chumbo calibre .22 LB de 3,3g, com geometria conforme apresentada na **(figura 1)**. A velocidade de boca em cada disparo foi aferida com um cronógrafo balístico (Air Chrony – modelo MK3), com precisão de 0,15 m/s.

A distância entre o provete e o alvo foi de 5 m, os corpos de prova foram apoiados em uma placa de madeira aglomerada de média densidade (MDF), conforme **figura 1**. Para comparação, foi realizado um ensaio apenas com a placa de MDF. Um supressor de ruídos foi utilizado para promover uma maior estabilidade do projétil ao sair do provete, assim como diminuir o ruído.



Fig. 1 – Imagem do projétil .22 utilizado no ensaio balístico

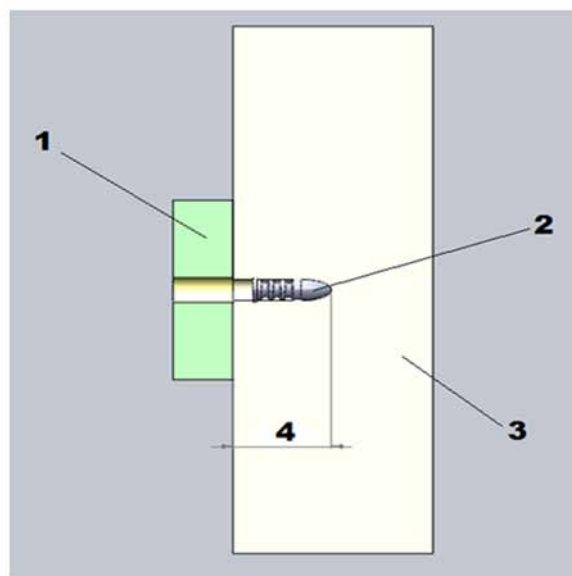


Fig. 2 – Imagem ilustrativa do ensaio balístico. 1 – Compósito; 2 – Projétil; 3 – Suporte de MDF; 4 – Medição da DOP

No ensaio balístico afere-se a profundidade de penetração (DOP), distância da ponta do projétil a face da blindagem, exemplificada na **figura 2**. Quanto menor for a DOP, mais eficaz será a proteção oferecida pela blindagem. Este tipo de teste, especialmente em munições ogivais (geometria usada no presente trabalho) tem forte dependência do material do alvo e da velocidade de impacto [17]. A simplicidade de execução, aliada ao baixo custo e facilidade na interpretação dos resultados, transformaram o ensaio de DOP na primeira opção de testes balísticos [18] the main goal being to find a way to increase the protection of soldiers and the vehicles used in the modern battlespace. Using of ceramic materials especially carbon based (carbides).

2.3 Microscopia

Após os testes balísticos, o compósito foi caracterizado por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) (Hitachi – modelo TM3000) com sistema de detecção por Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS) (Bruker – modelo X Flash MIN SVE). O MEV operou utilizando uma tensão de 15 keV e as imagens feitas em modo de Elétrons Retroespalhados (BSE), onde a diferença de cores é

dada pelo peso atômico dos elementos presentes na amostra, quanto menor o peso atômico mais escura será a tonalidade atribuída [19].

2.4 Propriedades físicas

A densidade do compósito foi calculada teoricamente, de acordo com a **equação 1**, e medida através do ensaio de Arquimedes de acordo com a norma ABNT NBR 16661-17 [20]. Ainda utilizando o ensaio de Arquimedes, a absorção de água foi medida de acordo com a norma ASTM D 792 [21].

$$\rho_{comp} = \frac{1}{\frac{W_{PEBD}}{\rho_{PEBD}} + \frac{W_{Al_2O_3}}{\rho_{Al_2O_3}}} \quad (1)$$

onde ρ é a densidade, W é o percentual em peso na mistura que formou o compósito.

2.5 Propriedades térmicas

Testes de flamabilidade foram executados de acordo com a norma ASTM D 635 [22]. As amostras foram fixadas a 10 cm da fonte de calor, um bico de bunsen, e mediu-se o tempo que a chama levou para se propagar em uma distância de 25 mm.

A estabilidade térmica do compósito foi analisada por Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC) (Netzsch – modelo DSC 404 F1 Pegasus), utilizando uma taxa de aquecimento de 10 °C/min até 200 °C, e atmosfera de nitrogênio.

3. Resultados e discussão

3.1 Ensaio balísticos

Quando o ensaio balístico foi realizado apenas com a placa de MPF, obteve-se uma DOP de $25,1 \pm 3,4$ mm, já quando o compósito era utilizado como material de proteção, a DOP foi reduzida para $2,7 \pm 0,3$ mm. Os resultados demonstram a efetividade do compósito proposto para aplicações de proteção balística de munição .22 LR. Caso ocorra um tiro disparado diretamente ao coração, uma penetração de 25 mm pode ser fatal, já uma penetração de aproximadamente

3 mm, provavelmente não causaria injúrias mais severas aos tecidos.

Figueiredo et al. [3] realizaram ensaios balísticos similares aos utilizados no presente estudo em compósitos fabricados com UHMPWE e diferentes percentuais de alumina. Os autores utilizaram corpos de prova com 5 mm de espessura e não utilizaram compósito com 70% de alumina, impedindo uma comparação mais direta. Para compósitos com 60% e 80% de alumina eles obtiveram, respectivamente, DOP de 14,5 mm e 6,9 mm.

Tab. 1 – Capacidade dos compósitos em reduzir a dop.

Compósito	Redução da DOP	Espessura do corpo de prova	Redução da DOP / mm de espessura
PEBD + 70 % Alumina	22,4 mm	15 mm	1,5 mm
UHMPWE + 60 % alumina [3]	10,6 mm	5 mm	2,12 mm
UHMPWE + 80 % alumina [3]	18,2 mm	5 mm	3,64 mm

Considerando que as espessuras dos corpos de prova utilizados neste estudo e no estudo de Figueiredo [3] são diferentes, 15 mm e 5 mm, respectivamente. A **tabela 1** apresenta os resultados de ambos os estudos através da capacidade do compósito em reduzir a DOP, quando comparada ao teste balístico apenas com MDF. Observa-se que o PEBD apresentou resultados inferiores ao UHMPWE, fato já esperado pois o PEBD possui menores energias de deformação, prejudicando a absorção da energia de impacto [23].

3.2 Microscopia

As **figuras 3 e 4** apresentam a superfície de fratura do compósito após o teste balístico. Diferentemente do procedimento utilizado em outros estudos, como por exemplo Figueiredo [3], que utilizou o MEV operando em modo de elétrons secundários, este trabalho utilizou o modo BSE, o que permitiu distinguir cada elemento do compósito. É observada a presença de uma matriz em tons mais escuros, partículas grandes em um tom de cinza claro, e pequenas regiões em coloração branca.

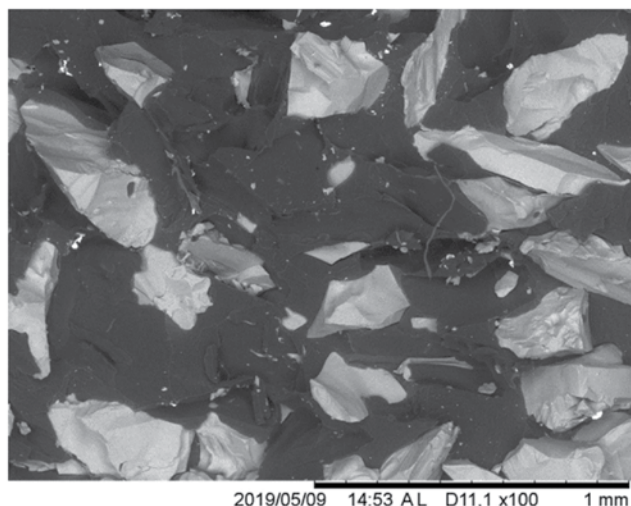


Fig. 3 – Imagem da região do impacto após o teste balístico. Imagem em MEV modo BSE, ampliação de 100x.

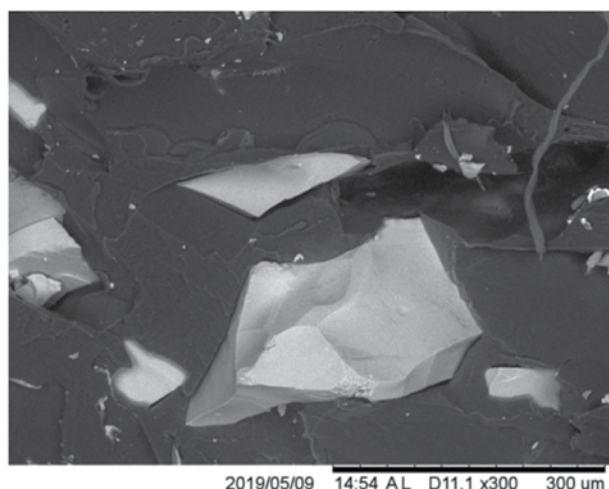


Fig. 4 – Imagem da região do impacto após o teste balístico. Imagem em MEV modo BSE, ampliação de 300x.

A técnica de EDS acoplada ao MEV permitiu confirmar a composição química de cada região. A matriz formada por PEBD adquiriu coloração mais escura, pois é formada basicamente pelo elemento químico carbono, o de menor peso atômico dentre os analisados. Os grãos de alumina adquiriram coloração cinza clara, sendo formados pela combinação dos elementos alumínio e oxigênio. E os pontos brancos são pequenos fragmentos do projétil utilizado pelo ensaio balístico de chumbo, elemento de maior peso atômico dentre os encontrados, por isso, adquiriu coloração mais clara.

3.3 Propriedades físicas

A densidade é uma importante propriedade a ser analisada em compósitos destinados a proteção balística de uso pessoal, pois a mobilidade dos usuários dos coletes é essencial em muitas ações de confronto. Aplicando a **equação 1**, o compósito apresenta uma densidade de $2,01 \text{ g/cm}^3$, a adição da alumina representa um grande aumento na densidade do PEBD, que é de $0,94 \text{ g/cm}^3$. A utilização do PEBD em substituição ao UHMWPE não representa grande ganho em relação à densidade, o compósito fica apenas cerca de 2% mais leve.

Outra importante propriedade física a ser analisada é a absorção de água. Em situações de guerra onde faz-se necessário que os soldados adentrem em rios ou mares, ou em confronto dentro das cidades por forças policiais em dias de chuva, caso a absorção de água seja grande, haverá um aumento do peso do colete, prejudicando muito a mobilidade do usuário. A absorção de água calculada de acordo com a norma ASTM D 792 foi de 1,21%, valor baixo que não compromete o desempenho do equipamento.

3.4 Propriedades térmicas

O polietileno além de possuir uma rápida propagação de chama, não possui característica de auto extinção de fogo [24], o que seria ideal para aplicação em coletes a prova de bala. Os ensaios de flamabilidade confirmaram a já esperada rápida queima do PEBD puro, 2,4 segundos. A adição de alumina retardou a propagação da chama de forma considerável, ampliando o tempo para 6,2 segundos, contudo, não conferiu ao material a propriedade de auto extinção da chama.

As **figuras 5 e 6** apresentam os gráficos de DSC para o primeiro e segundo aquecimento da amostra. A temperatura de pico do ensaio foi de $130,2^\circ\text{C}$ no primeiro aquecimento e $129,8^\circ\text{C}$ no segundo. E a temperatura de *onset* foi de $119,2^\circ\text{C}$ no primeiro aquecimento e $121,2^\circ\text{C}$ no segundo. Esses resultados indicam que o compósito foi capaz de suportar temperaturas altas, se consideradas as temperaturas as quais os usuários dos coletes podem

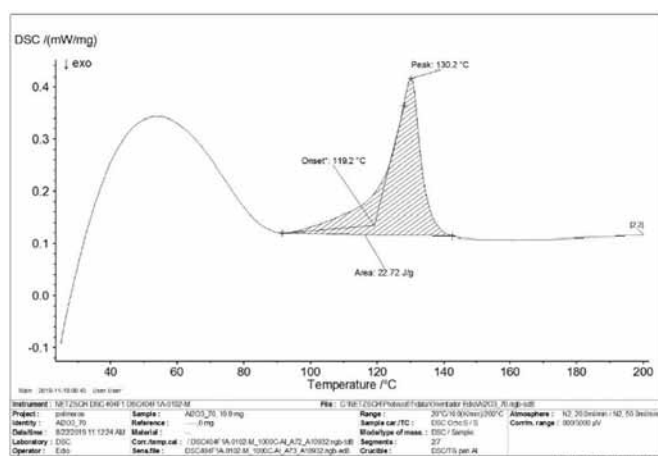


Fig. 5 – Resultado DSC para o compósito, 1º aquecimento.

ser expostos. Assim como confirmou que o compósito não se degrada após o primeiro aquecimento, suportando aquecimentos sucessivos, outro fator importante para aplicações balísticas.

4. Conclusão

Foi possível concluir que uma placa de 15 mm fabricada com o compósito proposto possui desempenho satisfatório para blindagem de projéteis .22 LR.

Referências Bibliográficas

- [1] Brasil, Anuário Brasileiro de Segurança Pública, Forum Brasileiro de Segurança Pública, 2018.
- [2] M. Naghavi, Global Mortality From Firearms 1990 - 2016, Journal of the American Medical Association, 2016.
- [3] A.B.-H. da S. Figueiredo, É.P. Lima Júnior, A.V. Gomes, G.B.M. de Melo, S.N. Monteiro, R.S. de Biasi, Response to Ballistic Impact of Alumina-UHMWPE Composites, Mater. Res. 21 (2018). doi:10.1590/1980-5373-mr-2017-0959.
- [4] E.G. Pickering, M.R. O'Masta, H.N.G. Wadley, V.S. Deshpande, Effect of confinement on the static and dynamic indentation response of model ceramic and cermet materials, Int. J. Impact Eng. 110 (2017) 123–137. doi:10.1016/j.ijimpeng.2016.12.007.
- [5] F.S. da Luz, E.P.L. Junior, L.H.L. Louro, S.N. Monteiro, Ballistic test of multilayered armor with intermediate epoxy composite reinforced with jute fabric, Mater. Res. 18 (2015) 170–177. doi:10.1590/1516-1439.358914.
- [6] S. Leo, C. Tallon, N. Stone, G. V. Franks, Near-Net-Shaping Methods for Ceramic Elements of (Body) Armor Systems, J. Am. Ceram. Soc. 97 (2014) 3013–3033. doi:10.1111/jace.13192.
- [7] M. V. Silva, D. Stainer, H.A. Al-Qureshi, O.R.K. Montedo, D. Hotza, Alumina-Based Ceramics for Armor Application: Mechanical Characterization and Ballistic Testing, J. Ceram. 2014 (2014) 1–6. doi:10.1155/2014/618154.
- [8] G.B. Torres, J.M. Vélez Restrepo, Fractografía y disipación de energía cinética en un panel balístico de cerámica/polímero sometido al impacto de un proyectil metálico, Rev. Mater. 18 (2013) 1350–1359. doi:10.1590/S1517-70762013000300003.
- [9] M.M. Shokrieh, G.H. Javadpour, Penetration analysis of a projectile in ceramic composite armor, Compos. Struct. 82 (2008) 269–276. doi:10.1016/j.compstruct.2007.01.023.
- [10] M. Bajja, A. Majumdar, B.S. Butola, S.K. Verma, D. Bhattacharjee, Design strategy for optimising weight and ballistic performance of soft body armour reinforced with shear thickening fluid, Compos. Part B Eng. 183 (2020) 107721. doi:10.1016/j.compositesb.2019.107721.

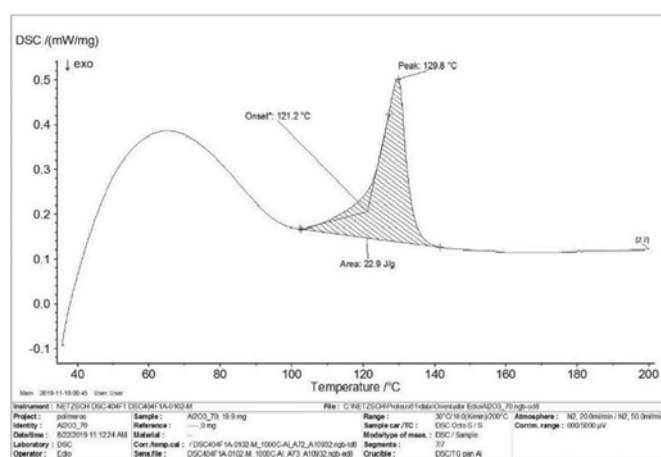


Fig. 6 – Resultado DSC para o compósito, 2º aquecimento.

O compósito fabricado com PEBD e alumina na proporção 70% de alumina e 30% de PEBD, apresentou baixa absorção de água e boa estabilidade quando exposto a altas temperaturas, propriedades necessárias para aplicações em coletes. Apesar da adição de alumina ter retardado a propagação de chamas no PEBD, não proporcionou ao compósito a capacidade de autoextinção de chama, que mesmo não sendo essencial para aplicações em coletes, seria desejável.

- [11] A. Majumdar, A. Laha, D. Bhattacharjee, I. Biswas, S. Verma, Soft body armour development by silica particle based shear thickening fluid coated p-aramid fabrics, *J. Text. Inst.* 110 (2019) 1515–1518. doi:10.1080/00405000.2019.1602896.
- [12] E. Medvedovski, Ballistic performance of armour ceramics: Influence of design and structure. Part 1, *Ceram. Int.* 36 (2010) 2103–2115. doi:10.1016/j.ceramint.2010.05.021.
- [13] C. Alberto, D.O. Couto, B. Cristina, E.H. Backes, F.R. Passador, U. Federal, D.S. Carlos, D. De Engenharia, D.M. Rodovia, W. Luís, Mechanical and thermal properties of UHMWPE / LLDPE / CNT blends and nanocomposites for ballistic application, *Materia.* (2018).
- [14] E. Medvedovski, Ballistic performance of armour ceramics: Influence of design and structure. Part 2, *Ceram. Int.* 36 (2010) 2117–2127. doi:10.1016/j.ceramint.2010.05.022.
- [15] A.L.S. Alves, L.F.C. Nascimento, J.C. Miguez Suarez, Comportamento balístico de compósito de polietileno de altíssimo peso molecular: efeito da radiação gama, *Polímeros.* 14 (2004) 105–111. doi:10.1590/s0104-14282004000200014.
- [16] F.M.B. Coutinho, I.L. Mello, L.C. de Santa Maria, Polietileno: principais tipos, propriedades e aplicações, *Polímeros.* 13 (2003) 01–13. doi:10.1590/s0104-14282003000100005.
- [17] J.S.S. Carlucci, *Ballistics: theory and design of guns and ammunition*, CRC, Boca Raton, 2008.
- [18] I.-D. Popa, F. Dobrița, Considerations on DOP (depth of penetration) test for evaluation of ceramics materials used in ballistic protection, *ACTA Univ. Cibiensis.* 69 (2018) 162–166. doi:10.1515/aucts-2017-0021.
- [19] J.I. Goldstein, D.E. Newbury, J.R. Michael, N.W.M. Ritchie, J.H.J. Scott, D.C. Joy, *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis*, 4th ed., Springer New York, New York, NY, 2018. doi:10.1007/978-1-4939-6676-9.
- [20] ABNT, NBR 16661 Materiais refratários densos conformados - Determinação do volume aparente, volume aparente da parte sólida, densidade de massa aparente, densidade aparente da parte sólida, porosidade aparente e absorção, ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2017.
- [21] ASTM, D 792 Standard test methods for density and specific gravity (relative density) of plastics by displacement, ASTM American Society for Testing and Materials, 2013.
- [22] ASTM, D 635 Standard test method for rate of burning and/or extent and time of burning of plastics in a horizontal position, ASTM American Society for Testing and Materials, 2018.
- [23] I. Mohagheghian, G.J. McShane, W.J. Stronge, Impact perforation of monolithic polyethylene plates: Projectile nose shape dependence, *Int. J. Impact Eng.* 80 (2015) 162–176. doi:10.1016/j.ijimpeng.2015.02.002.
- [24] V. Shah, *Handbook of plastics testing and failure analysis*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA, 2007. doi:10.1002/0470100427.

Biblioteca do Exército

Tradição e qualidade em publicações

A Biblioteca do Exército (BIBLIEx) - Casa do Barão de Loreto é uma centenária instituição cultural do Exército Brasileiro que contribui para o provimento, a edição e a difusão de meios bibliográficos necessários ao desenvolvimento e aperfeiçoamento da cultura profissional-militar e geral.

**SEJA NOSSO
ASSINANTE**

e receba nossos livros
editados em sua residência.



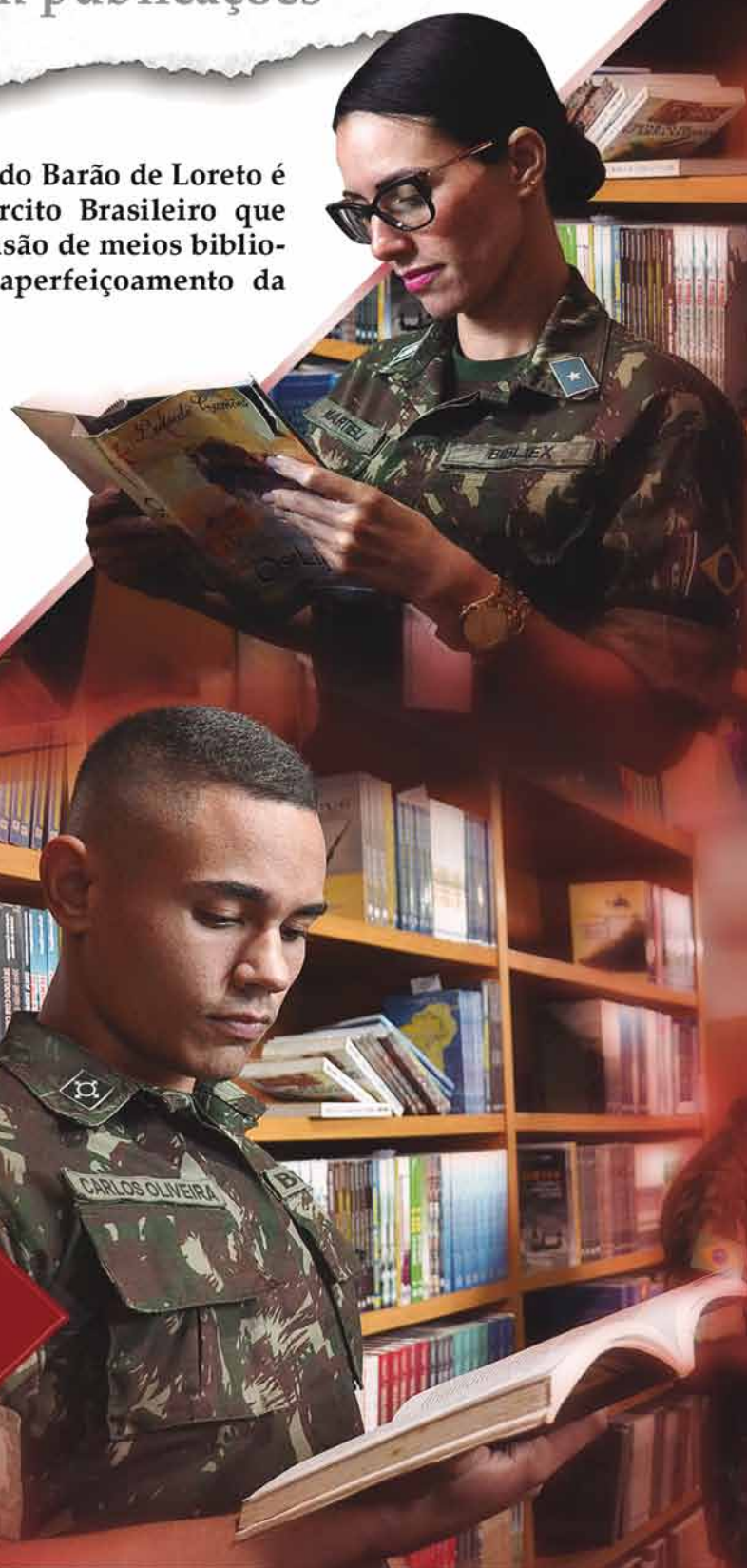
Tel.: (21) 2519-5707

Praça Duque de Caxias, nº 25
Palácio Duque de Caxias
Ala Marcílio Dias - 3º Andar
Centro - CEP 20.221-260
Rio de Janeiro - RJ



Acesse:

www.bibliex.eb.mil.br



Agora, você tem mais facilidade em suas mãos.

Acesse. Simule. Contrate.

Sujeito a alteração sem aviso prévio.
Consulte as normas e condições vigentes.



Correção pela
TR, pelo **IPCA**
ou juros
Prefixados

Juros ainda
menores

#fiqueemcasa



www.poupex.com.br

0800 61 3040



PÓS-GRADUAÇÃO NO IME

Bolsas: CAPES, CNPq e FAPERJ

Mestrado

- Engenharia Nuclear
- Engenharia Elétrica
- Engenharia de Transportes
- Sistemas e Computação

Mestrado e Doutorado

- Química
- Ciência dos Materiais
- Engenharia de Defesa



Apoio:



CREA-RJ
Conselho Regional de Engenharia, Arquitetura
e Agronomia do Rio de Janeiro

Matrículas: Fluxo Contínuo

Tel.: (21) 2546-7114 – Fax: (21) 2546-7089 – www.ime.eb.br – sd1@ime.eb.br