

# Desenvolvimento de Compósitos Híbridos de Silicone com FeMn, FeNi e Grafite para Atenuação Eletromagnética de Radares SAR na banda X

Mayara M. Boaro<sup>1</sup>, Felipe M. Gaia<sup>1</sup>, Vitor M. Yamamoto<sup>3</sup>, Felipe M. Yamamoto<sup>2</sup>, Giovana S. Cembraneli<sup>1</sup>, Braulio H. K. Lopes<sup>1</sup>, Mirabel C. Rezende<sup>2</sup>, Maurício R. Baldan<sup>2</sup>, Eduardo Antonelli<sup>1</sup>, Fabio R. Passador<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP), São José dos Campos/SP – Brasil

<sup>2</sup>Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais (INPE), São José dos Campos/SP – Brasil

<sup>3</sup>Instituto Federal de São Paulo (IFSP), São José dos Campos/SP – Brasil

**Resumo** – O avanço dos radares de abertura sintética (SAR) exige materiais absorvedores de radiação eletromagnética (MARE) altamente eficientes, especialmente na banda X. Este trabalho desenvolve compósitos flexíveis de matriz de silicone com adições de ferritas de manganês (FeMn), níquel (FeNi) e grafite. O silicone oferece estabilidade térmica e conformabilidade estrutural para geometrias aeronáuticas complexas. A incorporação das ferritas e do grafite modula a permissividade e permeabilidade complexas, otimizando o casamento de impedância e os mecanismos de perda magnética e dielétrica. O objetivo é avaliar a perda de reflexão (RL) destes compósitos, com foco em maximizar a absorbância na frequência 9,6 GHz. Os melhores resultados obtidos foram encontrados na concentração de 60% de FeMn+FeNi com a adição de 1% de grafite, onde houve uma atenuação de -33,36 dB, o que corresponde a uma absorção de 99,95% da energia eletromagnética. Os resultados confirmam o potencial do compósito híbrido para novas tecnologias de furtividade.

**Palavras-Chave** – MARE, Radar SAR, Compósito.

## I. INTRODUÇÃO

O avanço das telecomunicações e dos sistemas de radar de abertura sintética (SAR) impulsionam a pesquisa por materiais absorvedores de radiação eletromagnética (MARE) [3]. No setor aeroespacial, a mitigação da interferência eletromagnética (EMI) é crucial para tecnologias stealth [4]. Os MARE atenuam a onda incidente convertendo-a em calor por perdas magnéticas e dielétricas, o que reduz o sinal retroespalhado [3]-[11]. O principal obstáculo tecnológico consiste em desenvolver materiais leves, conformáveis e com expressiva Perda de Reflexão (RL) na banda X (8,2 a 12,4 GHz) [12]-[13]. Destaca-se a frequência de 9,6 GHz, padrão operacional crítico para sensores SAR em missões orbitais de alta resolução, como TerraSAR-X e COSMO-SkyMed [7]-[16]-[17].

Superando as limitações dos absorvedores convencionais, os compósitos poliméricos integram múltiplos mecanismos de dissipação [1]-[14]. O silicone é uma matriz atrativa devido à sua estabilidade termomecânica e maleabilidade para geometrias complexas [5]. A adição sinérgica de ferritas de FeMn, FeNi e grafite modula as propriedades magnéticas e dielétricas do material [11]-[14].

Esse ajuste otimiza o casamento de impedância, permitindo que a onda penetre na estrutura, o que intensifica a dissipação interna e a furtividade da plataforma [1]-[10]. Sob essa perspectiva, este estudo foca no desenvolvimento de compósitos de matriz de silicone com proporções híbridas de FeMn, FeNi e grafite. O objetivo é investigar a RL destes materiais, buscando a máxima absorbância em 9,6 GHz aliada à redução da espessura física do compósito. Em aplicações aeroespaciais, a mitigação de massa é crítica, tornando o balanço entre alta atenuação e baixo perfil o principal critério de viabilidade do MARE. Neste contexto, o potencial destes compósitos é avaliado através de caracterização em guia de ondas e predição computacional, visando tecnologias SAR na banda X.

## II. METODOLOGIA

A preparação dos compósitos híbridos foi realizada utilizando borracha de silicone como matriz polimérica e seu respectivo agente de cura. Para atuarem como fases dispersas responsáveis pela atenuação eletromagnética, foram selecionados pós de ferrita de FeMn, ferrita de FeNi e grafite.

A obtenção dos materiais ocorreu por intermédio de mistura mecânica. As proporções totais das cargas magnéticas na matriz foram estabelecidas em 40, 50, 60 e 70% em massa. Para cada uma dessas concentrações, a massa de carga foi dividida igualmente entre as duas ferritas (por exemplo, a proporção de 40% foi composta por 20% em massa de FeMn e 20% em massa de FeNi). Adicionalmente, o planejamento experimental foi dividido em duas partes, para cada proporção de ferrita formulada, produziu-se um conjunto de amostras sem a presença de grafite e um segundo conjunto contendo a adição de 1% em massa de grafite.

Inicialmente, o conjunto de particulados foi introduzido na matriz de silicone e submetido a um processo de agitação pelo período de 2 minutos, com o propósito de garantir uma distribuição uniforme e evitar a aglomeração das partículas. Tendo alcançado a dispersão adequada da mistura, o catalisador (agente de cura) foi inserido a uma razão de 5% em massa em relação ao silicone, prolongando-se a agitação por mais 2 minutos adicionais.

O material polimérico resultante foi então despejado em moldes de ácido polilático (PLA) confeccionados por impressão 3D. As cavidades destes moldes foram projetadas com dimensões transversais de 22,88 mm × 10,22 mm, medidas que correspondem estritamente ao encaixe no porta-amostras do guia de ondas da banda X. Na Fig. 1. é possível ver as amostras.

M. Boaro, mayaramartinezboaro@gmail.com; F. Gaia, felipe.gaia21@unifesp.br; V. Yamamoto, V.yamamoto@aluno.ifsp.edu.br; F. Yamamoto, felipe.yamamoto@inpe.br; G. Cembraneli, cembraneli@inpe.br; B. Lopes, braulio.kondo@gmail.com; M. Rezende, mirarezende@uol.com.br; M. Baldan, baldan@las.inpe.br; E. Antonelli, antonelli@unifesp.br; F. Passador, fabio.passador@unifesp.br.

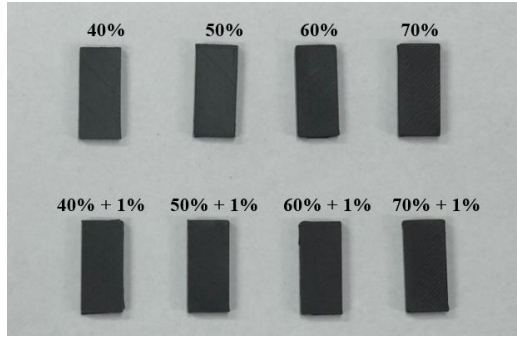


Fig. 1. Amostras de FeMn + FeNi na matriz polimérica de silicone e com a adição de 1% em massa de grafite.

Para avaliar o comportamento eletromagnético dos compósitos na referida banda X (intervalo de frequências de 8,2 a 12,4 GHz), procedeu-se com a medição de espalhamento (parâmetros S). Essa análise foi conduzida empregando-se um analisador de redes vetoriais (VNA), acoplado a um arranjo de guia de ondas de seção retangular [6], representado na Fig. 2. Com base nos resultados experimentais coletados, determinaram-se as propriedades eletromagnéticas intrínsecas das amostras, abrangendo a permissividade elétrica complexa ( $\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$ ) e a permeabilidade magnética complexa ( $\mu = \mu' - j\mu''$ ) [9].

Assim, a capacidade de absorção de radiação dos materiais foi mensurada através do cálculo da perda de reflexão (RL) [15], utilizando como base as seguintes formulações matemáticas, (1) (2):

$$RL(dB) = 20 \log_{10} \left| \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \right| \quad (1)$$

$$Z_{in} = \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \tanh \left\{ \left( j \frac{2\pi f}{c} t \right) \sqrt{\mu_r \epsilon_r} \right\} \quad (2)$$

Conforme apresentado em (1) e (2),  $Z_{in}$  indica a impedância de entrada normalizada do material, ao passo que  $Z_0$  refere-se à impedância característica do espaço livre. As grandezas  $\mu_r$  e  $\epsilon_r$  representam, nesta ordem, a permeabilidade magnética relativa e a permissividade elétrica relativa do compósito em estudo. Por fim, as variáveis  $f$ ,  $t$  e  $c$  correspondem à frequência da onda incidente, à espessura física da amostra testada e à velocidade de propagação da luz no vácuo, respectivamente.

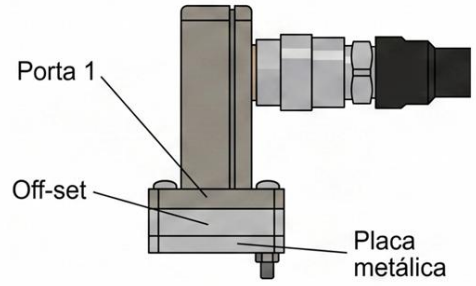
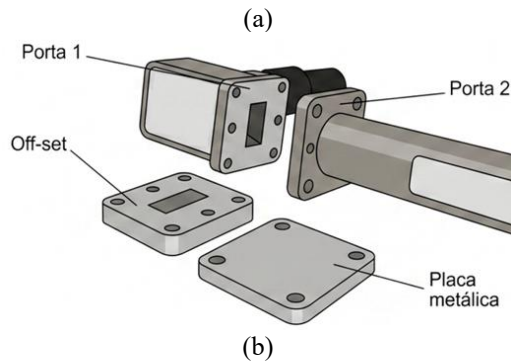


Fig. 2. (a) Detalhamento das peças do guia de ondas; (b) Representação do sistema para medição de refletividade.

Para prever o desempenho operacional dos compósitos híbridos atuando como revestimentos MARE, realizou-se um estudo computacional avançado utilizando o software de simulação eletromagnética FEKO (ALTAIR). A etapa inicial da simulação reproduziu o ambiente confinado de um guia de ondas de seção retangular, cujo modelo esquemático é apresentado na Fig. 3. A opção por modelar o material no interior do guia de ondas é fundamental metodologicamente, pois estabelece uma correspondência direta com a bancada experimental do VNA. Esse ambiente confinado impõe condições de contorno ideais de condutor elétrico perfeito (PEC) nas paredes, o que permite extrair a resposta do material sem a interferência de difrações de borda ou espalhamento difuso, garantindo o cálculo rigoroso da espessura ideal [8].

A partir da inserção dos dados experimentais de permissividade e permeabilidade complexas no simulador, conduziu-se uma varredura paramétrica de espessura para cada formulação. O objetivo foi sintonizar o pico máximo de perda de reflexão (RL) exatamente na frequência de 9,6 GHz, que representa a faixa crítica de operação dos radares SAR

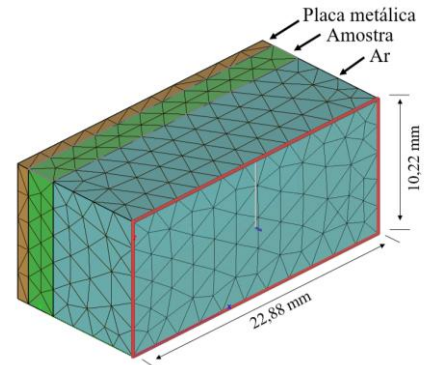


Fig. 3. Modelo criado no FEKO para a simulação do guia de onda.

### III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### III.A Propriedades eletromagnéticas intrínsecas e mecanismos de atenuação

A viabilidade dos compósitos híbridos para a mitigação de assinaturas de radares SAR na banda X fundamenta-se nas propriedades dielétricas e magnéticas do material. A análise da permissividade elétrica complexa revela que o aumento contínuo em massa das ferritas (FeMn e FeNi) eleva gradativamente a capacidade de armazenamento de energia do compósito, evidenciada pelo crescimento da componente  $\epsilon'$  na Fig. 4(a). Contudo, o impacto mais expressivo no desempenho dielétrico ocorre com a incorporação de 1% em massa de

grafite, Fig. 4(b) e Fig. 4(d). A adição deste agente condutor promove a formação de uma micro-rede dissipativa no interior da matriz de silicone, o que intensifica os mecanismos de polarização interfacial e a conversão de energia eletromagnética em calor ( $\epsilon''$ ), otimizando a absorção das ondas incidentes [10]-[14].

No que tange à resposta magnética, a permeabilidade complexa define a interação do compósito com o campo magnético das emissões SAR. A Fig. 4(e) e Fig. 4(f) demonstram que a parte real ( $\mu'$ ) mantém-se estável e próxima à unidade, apresentando uma leve redução nas amostras mais densamente carregadas (70%). Em contrapartida, a componente imaginária ( $\mu''$ ), responsável pela dissipação, na Fig. 4(g) e Fig. 4(h), evidencia que as ferritas cumprem seu papel fundamental. Os valores de  $\mu''$  indicam uma dissipação magnética contínua e estável ao longo de toda a banda X, impulsionada por ressonância natural e perdas por correntes de Foucault, especialmente nas frequências iniciais da banda [9]-[13]. O grafite, sendo não-magnético, não altera negativamente esse comportamento.

Essa avaliação conjunta comprova a eficácia da sinergia estrutural proposta para o MARE. O silicone garante a conformabilidade aeronáutica, as ferritas asseguram as perdas magnéticas indispensáveis, e a dopagem com grafite maximiza as perdas dielétricas [5]-[14]. Esse arranjo híbrido reduz a disparidade entre a impedância do espaço livre e a impedância de entrada do material, alcançando altos índices de atenuação.

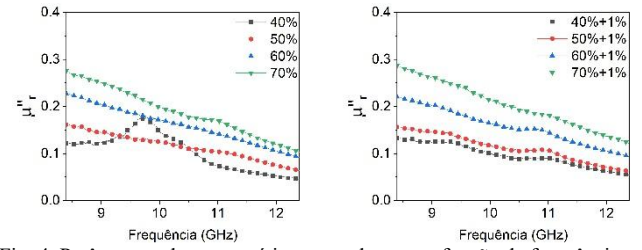


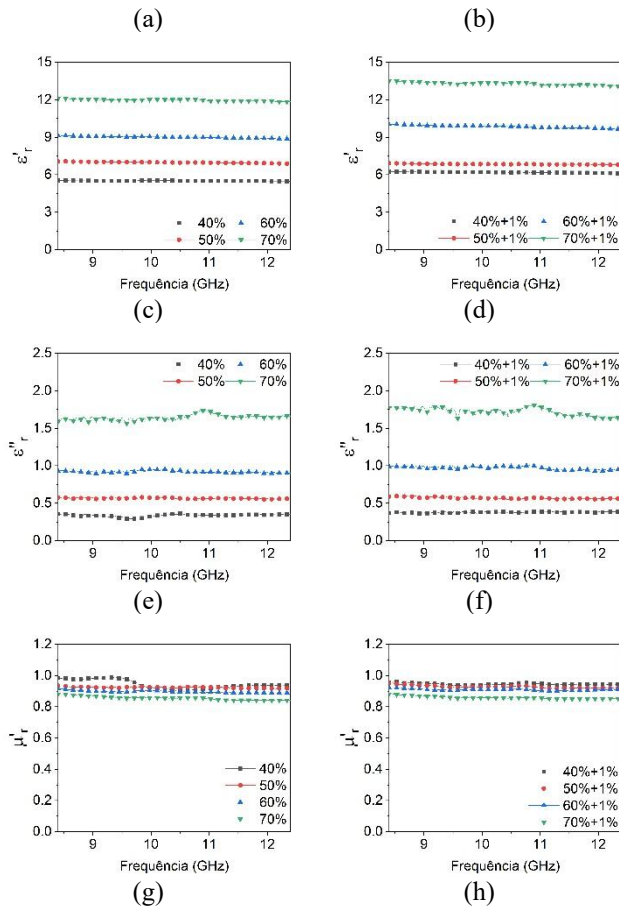
Fig. 4. Parâmetros eletromagnéticos complexos em função da frequência na Banda X. Partes real e imaginária da permissividade elétrica ( $\epsilon'$  e  $\epsilon''$ ) para as concentrações de 40 a 70% em massa de FeMn+FeNi (a)-(c) e com adição de 1% em massa de grafite (b)-(d). Partes real e imaginária da permeabilidade magnética ( $\mu'$  e  $\mu''$ ) para as mesmas concentrações base (e)-(g) e com 1% adicional (f)-(h).

### III.B Análise das Tangentes de Perda Eletromagnética

Para aprofundar a compreensão dos mecanismos de atenuação responsáveis pelo desempenho do material na banda X, é imperativo avaliar as tangentes de perda dielétrica ( $\tan \delta_\epsilon = \epsilon''/\epsilon'$ ) e magnética ( $\tan \delta_\mu = \mu''/\mu'$ ) [3]. Esses parâmetros adimensionais quantificam a eficiência intrínseca do compósito em dissipar a energia eletromagnética armazenada, convertendo-a em energia térmica, sendo indicadores diretos da capacidade de absorção do MARE.

A análise comparativa das tangentes de perda dielétrica ( $\tan \delta_\epsilon$ ) evidencia que os valores se mantêm baixos em toda a banda de frequência para todas as formulações, situando-se inteiramente abaixo de 0,15. Nas amostras contendo exclusivamente as ferritas de FeMn e FeNi, apresentadas na Fig. 5(a), a dissipação dielétrica é sutil e cresce discretamente com o aumento da fração mássica de carga. Com incorporação de 1% em massa de grafite, mostrada na Fig. 5(b), observa-se que essa baixa concentração carbonácea não provocou uma elevação expressiva ou picos abruptos na magnitude de  $\tan \delta_\epsilon$ , preservando o perfil suave das curvas ao longo da banda X. Esse comportamento indica que a adição minimalista de grafite atuou de forma controlada na matriz de silicone, permitindo sintonizar as propriedades dielétricas sem gerar uma condutividade excessiva que pudesse causar reflexão indesejada na interface do material.

Por outro lado, a análise das tangentes de perda magnética ( $\tan \delta_\mu$ ) revela valores consideravelmente superiores aos dielétricos, confirmando o caráter predominantemente magnético da atenuação. Como observado nas Figs. 5(c) e 5(d), a magnitude de  $\tan \delta_\mu$  escala diretamente com o aumento do teor de ferritas, atingindo valores máximos próximos a 0,32 nas frequências iniciais da banda para as composições de 70%. A comparação morfológica entre os espectros de perda magnética pura e os dopados com grafite revela uma alteração singular na menor concentração de carga. Na Fig. 5(c) (sem grafite), a amostra de 40% exibe um pico de ressonância natural bem delimitado em aproximadamente 9,8 GHz, alcançando cerca de 0,18. Contudo, com a introdução de 1% de grafite na formulação de 40% + 1% [Fig. 5(d)], esse pico de ressonância é suprimido, transformando-se em um decréscimo linear e amortecido com o avanço da frequência. Para as concentrações mais elevadas (50, 60 e 70%), a presença do grafite não altera substancialmente a morfologia ou a magnitude das curvas, as quais mantêm a tendência de



declínio monotônico característica dos fenômenos de relaxação magnética e perdas por correntes de Foucault (*eddy currents*) em altas frequências [2]-[13].

Esses resultados confirmam o sucesso do planejamento estrutural do compósito. As perdas magnéticas ( $\tan \delta_\mu$ ) são garantidas e sustentadas pela distribuição equitativa das ferritas de manganês e níquel, enquanto a resposta dielétrica controlada atua de forma complementar sem saturar o meio. Essa sinergia física assegura a atenuação mútua das componentes elétrica e magnética na faixa de frequência de trabalho do radar SAR, resultando nos excelentes índices de reflexão observados em 9,6 GHz.

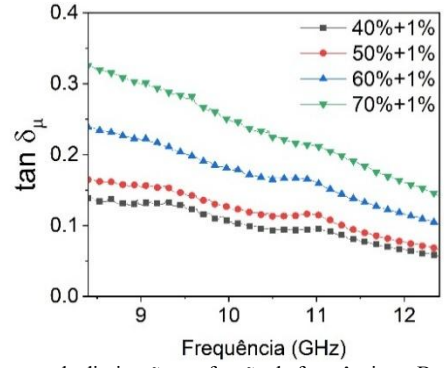
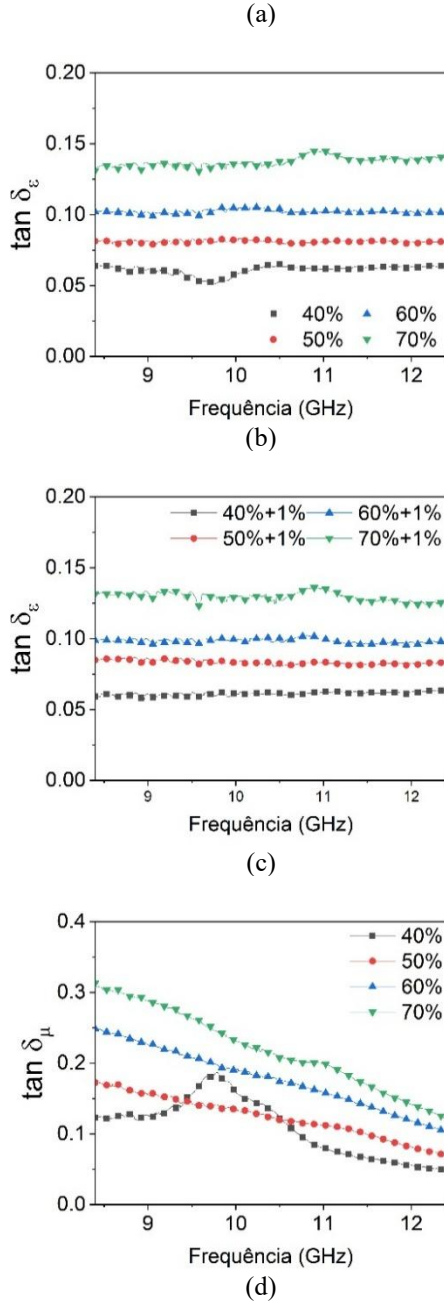


Fig. 5. Fatores de dissipação em função da frequência na Banda X. Tangente de perda dielétrica ( $\tan \delta_\epsilon$ ) para as concentrações de 40 a 70% em massa de FeMn+FeNi (a) e com adição de 1% em massa de grafite (b). Tangente de perda magnética ( $\tan \delta_\mu$ ) para as mesmas concentrações base (c) e com a adição de 1% (d).

### III.C Simulação Eletromagnética e Otimização da Perda de Reflexão (Refletividade)

A partir da modelagem computacional do guia de onda e da inserção dos parâmetros eletromagnéticos extraídos experimentalmente, conduziu-se uma varredura paramétrica de espessura para cada formulação no software de simulação FEKO (ALTAIR). Destaca-se que as propriedades intrínsecas do material foram mensuradas e validadas de forma experimental, enquanto os índices de perda de reflexão (RL) expostos nesta seção consistem em previsões computacionais fundamentadas nesses parâmetros físicos. O intuito principal desta etapa foi otimizar o casamento de impedância e sintonizar o pico máximo de perda de reflexão (RL) exatamente na frequência crítica de 9,6 GHz, alvo principal dos radares SAR operantes na banda X [4]-[7]. A Fig. 6 compila as curvas de refletividade resultantes dessa otimização simulada, ilustrando o melhor desempenho teórico alcançado por cada concentração de carga magnética, tanto para as matrizes base quanto para as dopadas com grafite.

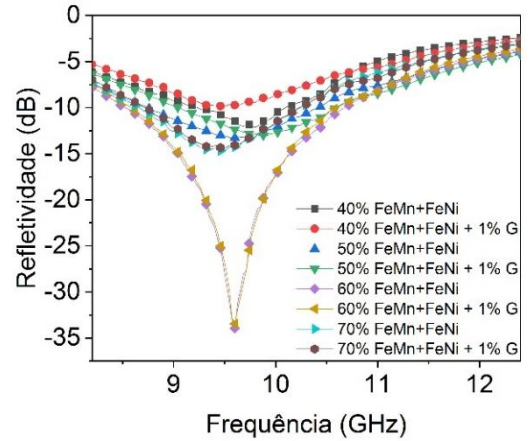


Fig. 6. Curva de todas as melhores atenuações encontradas em cada concentração.

A otimização das espessuras e os respectivos valores máximos de atenuação extraídos destas curvas estão sumarizados na Tabela I. A análise dos dados evidencia que o controle consistente da espessura da camada absorvedora no modelo computacional permitiu sintonizar o pico de absorção

exato em 9,6 GHz para todas as amostras avaliadas. No entanto, a intensidade da absorção predita variou expressivamente em função do balanço físico-químico de cada compósito.

Conforme apresentado na Tabela I, a formulação contendo 60% em massa de ferritas puras atingiu a maior atenuação absoluta do estudo (-33,88 dB). Contudo, a amostra análoga dopada com 1% em massa de grafite apresentou um valor bastante próximo (-33,36 dB). Em termos operacionais, essa diferença de 0,52 dB é praticamente irrelevante, visto que os cálculos garantem que ambas as formulações absorvem teoricamente mais de 99,9% da energia eletromagnética incidente [15].

O grande diferencial tecnológico da amostra dopada reside na redução de sua espessura otimizada. A adição do agente carbônico eleva a permissividade elétrica complexa da matriz polimérica [10]-[14], o que aprimora o casamento de impedância ( $Z_{in} \approx Z_0$ ) e possibilita que a condição de ressonância de quarto de onda seja alcançada com um perfil estrutural mais fino [3]-[11].

Ao comparar as duas versões de 60%, nota-se que a presença de apenas 1% de grafite reduziu a espessura final projetada para a amostra de 2,80 mm para 2,65 mm. Este resultado prediz uma redução física de 0,15 mm, correspondendo a uma diminuição de 5,35% em relação à amostra sem o particulado de carbono. Para o setor aeroespacial, o dimensionamento de revestimentos furtivos (*stealth*) para fuselagens extensas exige a minimização do peso agregado [3]-[10]. Portanto, essa diminuição de espessura obtida via predição computacional indica um alto potencial de economia de massa para plataformas de voo [1]. Isso consolida a formulação híbrida de 60% + 1% de grafite como a candidata mais promissora do estudo para futuras etapas de desenvolvimento e aplicação na mitigação de radares SAR [4].

TABELA I. TODAS AS CONCENTRAÇÕES DAS AMOSTRAS COM SUAS MELHORES ATENUAÇÕES E RESPECTIVAS ESPESURAS

| Concentração | Melhor atenuação total (dB) | Espessura (mm) |
|--------------|-----------------------------|----------------|
| 40%          | -11,50                      | 3,60           |
| 40%+1%       | -9,73                       | 3,30           |
| 50%          | -14,29                      | 3,20           |
| 50%+1%       | -14,07                      | 3,20           |
| 60%          | -33,88                      | 2,80           |
| 60%+1%       | -33,36                      | 2,65           |
| 70%          | -13,30                      | 2,50           |
| 70%+1%       | -12,38                      | 2,30           |

Com a finalidade de validar a aplicabilidade desta formulação otimizada (60% em massa de ferritas + 1% em massa de grafite) para cenários aeroespaciais reais, executou-se uma segunda etapa de simulação. A Fig. 7 apresenta a comparação direta entre o comportamento do material no guia de ondas e a sua resposta sob incidência no espaço livre (ondas planas). Essa transição comparativa é indispensável, uma vez que plataformas aeronáuticas, como aeronaves e drones, operam em ambientes abertos. No espaço livre, a interação da onda com a estrutura envolve dinâmicas complexas de

incidência e ausência de restrições laterais, o que altera as condições de reflexão [4].

Conforme ilustrado na Fig. 7, ao transpor o material para o espaço livre, o pico de refletividade sofre uma atenuação de magnitude esperada, acomodando-se em valores próximos a -16 dB. Apesar da redução de amplitude inerente ao meio não confinado, o compósito demonstra uma notável estabilidade física, mantém-se sintonizado na região alvo de 9,6 GHz e supera com margem de segurança o requisito técnico e tático de -10 dB (padrão que assegura a dissipação de 90% da energia radar) [6]-[7]. Isso atesta a viabilidade e a eficiência operacional do compósito desenvolvido.

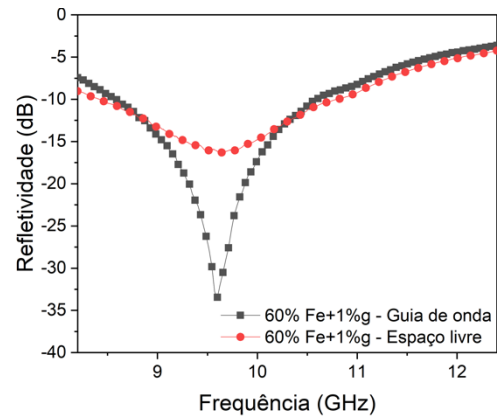


Fig. 7. Comparação entre os melhores picos simulados no guia de onda e no espaço livre na concentração de 60% em massa de FeNi+Mn + 1% em massa de grafite.

#### III.D Análise Comparativa de Desempenho

Para dimensionar a relevância tecnológica do compósito otimizado neste estudo (60% de FeMn+FeNi com 1% de grafite), a Tabela 2 apresenta uma comparação com outros materiais absorvedores de radiação eletromagnética reportados na literatura. Observa-se que, embora compósitos baseados em grafeno, como o reportado por Meng et al. [14], alcancem picos absolutos de refletividade mais profundos (-42,00 dB), essa máxima atenuação ocorre no extremo da banda X (12,4 GHz). Em contrapartida, o uso de cargas puramente magnéticas, como a carbonila de ferro em matriz de silicone investigada por Qing et al. [19], resulta em um desempenho significativamente inferior na mesma banda (-10,28 dB em 11,2 GHz).

O trabalho de Sun et al. [18] apresenta um pico de atenuação muito próximo ao alcançado nesta pesquisa (-33,00 dB) com uma espessura extremamente reduzida (0,25 mm), porém sintonizado em 11,0 GHz. O principal diferencial da formulação desenvolvida no presente trabalho consiste no alcance de uma altíssima taxa de absorção de -33,36 dB (equivalente a mais de 99,9% de dissipação de energia) sintonizada de forma exata na frequência de 9,6 GHz, o padrão crítico para radares SAR. Aliado a uma espessura viável de 2,65 mm, esse balanço atesta a eficiência da sinergia entre as ferritas e a micro-rede condutora de grafite em uma matriz de silicone conformável.

TABELA 2. COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO DE ATENUAÇÃO ELETROMAGNÉTICA ENTRE O COMPÓSITO OTIMIZADO E OUTROS MATERIAIS DA LITERATURA.

| Referência        | Composição do Material/Matriz             | Frequência Sintonizada (GHz) | Espessura (mm) | Perda de Reflexão Máxima (dB) |
|-------------------|-------------------------------------------|------------------------------|----------------|-------------------------------|
| Presente Trabalho | 60% (FeMn+FeNi) + 1% Grafite em Silicone  | 9,6                          | 2,65           | -33,36                        |
| Sun et al. [18]   | Ferrita de Estrôncio + Fe / Silicone      | 11,0                         | 0,25           | -33,00                        |
| Duan et al. [19]  | Carbonila de Ferro / Borracha de Silicone | 11,2                         | 4,00           | -10,28                        |
| Meng et al. [14]  | Compósitos baseados em Grafeno            | 12,4                         | 2,10           | -42,00                        |

#### IV. CONCLUSÃO

Este estudo consolidou o desenvolvimento de MARE flexíveis para mitigar assinaturas de radares SAR na banda X. A matriz de silicone reforçada com ferritas (FeMn e FeNi) e dopada com 1% de grafite revelou uma excelente sinergia física, onde o agente carbônico potencializou as perdas dielétricas, complementando perfeitamente a atenuação magnética fornecida pelas ferritas.

O compósito com 60% de carga magnética e 1% de grafite apresentou o melhor balanço de impedância. Embora a formulação sem grafite tenha registrado o maior pico teórico (-33,88 dB), a amostra dopada é mais promissora: sustentou uma absorção de -33,36 dB em 9,6 GHz (>99,9%) e permitiu uma redução de 5,35% (0,15 mm) na espessura física. Simulações em espaço livre também superaram o limite tático exigido de -10 dB, mantendo a atenuação em -16 dB.

A conformabilidade estrutural do silicone combinada a esse desempenho ratifica o potencial tecnológico do compósito híbrido. Embora os resultados derivem de caracterizações em guia de ondas e previsões computacionais, eles atestam a robustez das formulações, estabelecendo uma base científica sólida para futuras aplicações práticas em furtividade e controle de assinaturas em equipamentos de defesa.

#### REFERÊNCIAS

- [1] C. Li, S. Huang, S. Peng, L. Qiu, Q. Wu, L. Deng, "Enhanced microwave absorption and corrosion resistance of carbonyl iron encapsulated by silicone modified epoxy resin", *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 602, p. 172157, 2024.
- [2] A. Mehri, S. A. Seyyed Ebrahimi, Z. Lalegani, "Excellent X-band microwave absorption with high aspect ratio nickel nanowires synthesized by sol-gel method and vacuum suction in anodic aluminum oxide template", *Mater. Sci. Eng. B*, vol. 323, p. 118793, 2026.
- [3] H. Wu, J. Luo, M. Yang, *Electromagnetic Wave Absorbing Materials: Fundamentals and Applications*, 2nd ed. New York, NY: Academic Press, 2024, vol. 1.
- [4] V. C. Chen, R. Lipps, M. Bottoms, "Advanced synthetic aperture radar imaging and feature analysis", in *Proc. Int. Conf. Radar*, Adelaide, Australia, 2003, pp. 22–29.

- [5] C. Casut, D. Ursu, M. Miclau, I. Malaescu, C. N. Marin, "Investigation of electrical conduction mechanisms in silicone rubber—bismuth ferrite composites", *Crystals*, vol. 15, no. 8, p. 721, 2025.
- [6] Mirabel Cerqueira Rezende, Inácio Malmonge Martin, Roselena Faez, Marcelo Alexandre Souza Miacci, Evandro Luís Nohara, "Radar Cross Section Measurements (8-12 GHz) of Magnetic and Dielectric Microwave Absorbing Thin Sheets", *Revista de Física Aplicada e Instrumentação*, vol. 15, no. 1, pp. 24-29, dezembro 2002.
- [7] Z. Yang, Y. Yang, X. Zhao, X. Wang, C. Sun, C. Guo, X. Su, Q. Hao, "Dynamic graphical control of camouflage color with microwave/infrared stealth based on electromagnetic metastructures", *Opt. Express*, vol. 33, p. 15032–15043, 2025.
- [8] O. Kiris, F. Ozturk, "Dielectric characterization using waveguide method for antenna and radome materials in space applications", *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 66, p. e34246, 2024.
- [9] A. M. Gama, M. C. Rezende, "Complex permeability and permittivity variation of radar absorbing materials based on MnZn ferrite in microwave frequencies", *Mater. Res.*, vol. 16, no. 5, p. 997–1001, 2013.
- [10] W. Xu, J. Song, J. Li, Y. Shen, X. Du, "Carbon-based composite materials with high microwave absorption performance: Current research status and prospects", *J. Alloys Compd.*, vol. 1074, p. 188966, 2026.
- [11] M. Crespo, N. Méndez, M. González, J. Baselga, J. Pozuelo, "Synergistic effect of magnetite nanoparticles and carbon nanofibres in electromagnetic absorbing composites", *Carbon*, vol. 74, p. 63–72, 2014.
- [12] A. O. Garzón Posada, D. A. Landínez Téllez, J. Roa-Rojas, J. R. Ramos Barrado, "Electromagnetic shielding response of magnetite elastomeric composites: Source and filler content dependence", *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 9, no. 5, p. 10597–10607, 2020.
- [13] Y. E. Gunanto, T. Siregar, F. B. Susetyo, J. Setiawan, Yunasfi, Mashadi, Suyanti, Y. Taryana, W. A. Adi, "Enhanced X-band microwave absorbing properties of cerium-substituted cobalt ferrite through solid-state reaction method", 2024, não publicado.
- [14] F. Meng, H. Wang, F. Huang, Y. Guo, Z. Wang, D. Hui, Z. Zhou, "Graphene-based microwave absorbing composites: A review and prospective", *Compos. Part B Eng.*, vol. 137, p. 260–277, 2018.
- [15] F. d. Yamamoto, M. T. Fabbro, B. H. K. Lopes, "Synthesis and microwave absorption properties of AgVO<sub>3</sub>/Ag<sub>2</sub>CrO<sub>4</sub> heterostructure in the K-band", *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, vol. 35, p. 897, 2024.
- [16] SILVA, R. C. da; FERREIRA, W. J. Desempenho comparativo de modelos digitais de elevação na região do Vale do Paraíba e Litoral Norte de São Paulo, Brasil. *Caminhos de Geografia*, Uberlândia, v. 26, n. 108, p. 185-201, dez. 2025.
- [17] BAGHDADI, N. et al. Signal level comparison between TerraSAR-X and COSMO-SkyMed SAR sensors. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, v. 12, n. 3, p. 448-452, mar. 2015.
- [18] W.-F. Sun, P.-B. Sun, "Electrical insulation and radar-wave absorption performances of nanoferrite/liquid-silicone-rubber composites", *Int. J. Mol. Sci.*, vol. 23, no. 18, p. 10424, 2022.
- [19] Y. Duan, G. Li, L. Liu, et al., "Electromagnetic properties of carbonyl iron and their microwave absorbing characterization as filler in silicone rubber", *Bull. Mater. Sci.*, vol. 33, pp. 633–636, 2010.