

Estudo de Compósitos Poliméricos Porosos para Atenuação da Onda Eletromagnética à Base de Silicone e Ferrocarbonila na Banda K

Valéria Cristine de Oliveira¹, Thiago Ferreira Claudiano², Fernanda Ribeiro Freitas², Mayara Martinez Boaro⁴, Felipe Mutolese Gaia⁴, Felipe de Moraes Yamamoto³, Bráulio Haruo Kondo Lopes^{3,4}, Jorge Tadao Matsushima¹, Fábio Roberto Passador⁴, Maurício Ribeiro Baldan³

¹Faculdade de Tecnologia - Prof. Jessen Vidal (FATEC), São José dos Campos/SP – Brasil

²Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP), São José dos Campos/SP – Brasil

³Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos/SP – Brasil

⁴Universidade Federal de São Paulo (Unifesp), São José dos Campos/SP – Brasil

Resumo - O avanço das tecnologias associadas ao 5G tem intensificado a poluição e interferência eletromagnéticas, impondo desafios a setores de tecnologia como telecomunicações, aeroespacial e Defesa. Neste trabalho foi desenvolvido um Material Absorvedor de Radiação Eletromagnética (MARE) com estrutura polimérica porosa, utilizando borracha siliconada e pó de ferrocarbonila (FC) como absorvedor magnético. O estudo investigou a atenuação de ondas eletromagnéticas na banda K. A produção dos compósitos magnéticos consistiu na incorporação de partículas de FC à matriz polimérica, gerando amostras com concentrações de 50%, 60% e 70% em massa. Para induzir microestruturas, foram aplicadas diferentes pressões negativas. Em ensaios de espaço livre, o compósito contendo 60% de FC apresentou refletividade de -37,33 dB em 24,13 GHz correspondendo a uma atenuação de 99,98%. Os resultados obtidos validam a eficiência do compósito para aplicações de blindagem eletromagnética, consolidando-o como uma solução promissora para aplicações estratégicas no setor aeroespacial e de Defesa.

Palavras-Chave – MARE, materiais compósitos porosos, tecnologia 5G.

I. INTRODUÇÃO

O avanço acelerado das tecnologias de telecomunicação, impulsionado pela expansão das redes de quinta geração (5G) e pela proliferação de sistemas aeroespaciais e de defesa, resultou em aumento significativo da ocupação do espectro da radiofrequência. Esse cenário fundamenta o atual estado da arte do problema da poluição eletromagnética, caracterizado pela saturação do meio por ondas espúrias, o que potencializa a ocorrência de interferências eletromagnéticas (EMI) e degrada o desempenho de circuitos eletroeletrônicos sensíveis [1]-[3].

Atualmente, as investigações científicas e tecnológicas concentram-se de forma intensiva na mitigação desses efeitos na banda K (18 a 26,5 GHz), uma faixa de frequências amplamente empregada em enlaces de satélite, radares de curto alcance e aplicações de alta densidade de dados. Essa banda torna-se particularmente suscetível a ruídos e acoplamentos indesejados [4], [5].

V. Oliveira, olivalerie17@gmail.com; T. Claudiano, thiago.claudiano@aluno.ifsp.edu.br; F. Freitas, fernanda.freitas@inpe.br; M. Boaro, mayara.martinez@unifesp.br; F. Gaia, felipe.gaia21@unifesp.br; F. Yamamoto, felipe.yamamoto@inpe.br; B. Lopes, braulio.kondo@gmail.com; J. Matsushima, jorge.matsushima@cps.sp.gov.br; F. Passador, fabio.passador@unifesp.br; M. Baldan, mauricio.baldan@inpe.br.

Para enfrentar esses desafios operacionais, o desenvolvimento de materiais absorvedores de radiação eletromagnética (MARE) apresenta-se como uma contramedida mandatória. Nesse contexto, este trabalho investigou o potencial de atenuação, na banda K, de compósitos à base de ferrocarbonila (FC) e silicone, submetidos a diferentes níveis de pressão de vácuo durante o processamento, possibilitando avaliar a influência dessas condições de processamento sobre o comportamento eletromagnético do material.

II. METODOLOGIA

As amostras de compósito magnético foram sintetizadas utilizando uma matriz de borracha de silicone aditivada com partículas de FC (Fig. 1), estabelecendo-se concentrações de 50%, 60% e 70% em massa. As amostras foram processadas utilizando um sistema de vácuo com pressão controlada, aplicada durante o processo de cura e empregados níveis de pressão manométrica de 0, -50, -150, -250, -350 e -450 mmHg.

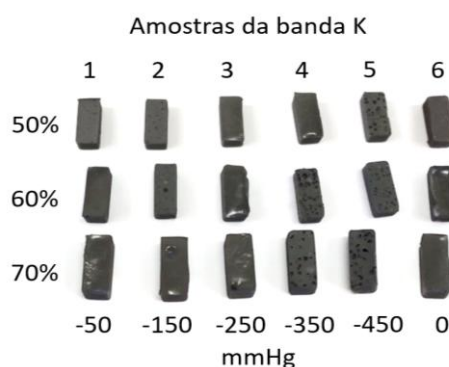


Fig. 1. Foto das amostras.

A aplicação dessas diferentes condições de pressão teve como objetivo promover modificações microestruturais nas amostras e avaliar seus efeitos sobre a permissividade elétrica complexa, a permeabilidade magnética complexa e o desempenho de absorção eletromagnética dos compósitos. Ressalta-se que, no presente estudo, a pressão aplicada durante o processamento constitui a variável experimental diretamente controlada, não tendo sido realizadas medidas quantitativas independentes da fração de poros, do tamanho médio e da distribuição dos poros ou da densidade aparente. Dessa forma, as amostras são comparadas neste trabalho em

função das respectivas condições de processamento sob pressão de vácuo.

A caracterização eletromagnética das propriedades intrínsecas do material foi conduzida na faixa de micro-ondas correspondente à banda K (18 a 26,5 GHz), utilizando um analisador de redes vetorial (*Vector Network Analyzer* - VNA) acoplado a um sistema de guia de ondas. Para a determinação das propriedades eletromagnéticas intrínsecas das amostras (ϵ , μ) modificadas em função do sistema de vácuo, foi realizado o ensaio de reflexão e transmissão. Este procedimento consistiu na medição dos parâmetros de espalhamento S_{11} e S_{21} seguido do tratamento algébrico dos dados por meio do método de Nicholson-Ross-Weir (NRW). De forma complementar, a capacidade de dissipação eletromagnética do material foi quantificada por meio do ensaio de Perda por Reflexão (*Reflection Loss* - RL) em sistema de espaço livre. Para a realização deste ensaio, utilizou-se uma placa metálica de alumínio posicionada na face posterior da amostra como padrão de metalização (100% de refletividade), permitindo obter os valores de RL a partir do comportamento do sinal refletido, conforme ilustrado na Fig. 2.

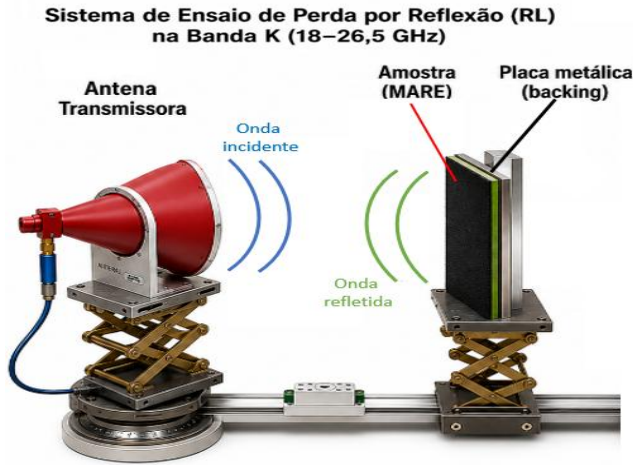


Fig. 2. Representação esquemática do sistema de medida de RL.

A avaliação do desempenho absorptivo dos compósitos foi realizada por meio do cálculo de RL, fundamentado nas relações matemáticas expressas nas Equações (1) e (2) [1], [6].

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

onde,

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

Nas Equações (1) e (2), Z_0 representa a impedância característica do espaço livre enquanto Z_{in} corresponde à impedância de entrada normalizada do meio. As propriedades eletromagnéticas da amostra são descritas pela permissividade elétrica relativa (ϵ_r) e pela permeabilidade magnética relativa (μ_r). Adicionalmente, o modelo

matemático incorpora a espessura física do material (t), a frequência da onda eletromagnética incidente (f) e a velocidade de propagação da luz no vácuo (c).

A referência para calibração e normalização foi uma placa metálica de alumínio (quase 100% de reflexão), a qual foi posicionada atrás da amostra.

As antenas foram posicionadas a uma distância de 400 mm do centro da amostra. Para medição de incidência normal, foi utilizada uma antena com o sinal de reflexão S_{11} .

Além disso, as amostras foram avaliadas com espessura de 4,5 mm para os ensaios na banda K no Guia de Onda. As amostras de espaço livre foram desenvolvidas com área de 100 x 100 mm e mesma espessura de 4,5 mm.

III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com o objetivo de avaliar a influência das diferentes condições de pressão de vácuo aplicadas durante o processamento e da concentração de FC sobre as propriedades eletromagnéticas dos compósitos desenvolvidos, foram analisadas a permissividade elétrica, a permeabilidade magnética e RL na banda K (18 a 26,5 GHz).

As amostras foram classificadas de acordo com a pressão utilizada durante o processamento e estão apresentadas na TABELA I.

TABELA I – CLASSIFICAÇÃO DAS AMOSTRAS

Amostra	1	2	3	4	5	6
Pressão (mmHg)	-50	-150	-250	-350	-450	0

A. Análise relativa à permissividade elétrica

A análise conjunta da permissividade elétrica real (ϵ') e imaginária (ϵ''), apresentadas nas Fig. 3 e Fig. 4, demonstra que as diferentes condições de pressão negativa aplicadas durante o processamento não alteraram significativamente o comportamento dispersivo do material ao longo da banda K. A amostra de referência (amostra 6, 0 mmHg), correspondente à condição processada sem aplicação de pressão negativa, apresentou comportamento praticamente linear e constante para todas as concentrações avaliadas, indicando estabilidade dielétrica na faixa de frequência investigada.

Conforme pode ser visualizado na Fig. 3, os valores médios de ϵ' mantiveram-se entre 4,2 e 4,3, evidenciando que, nas condições investigadas, as modificações promovidas pelas diferentes pressões de processamento não produziram alterações expressivas na capacidade de armazenamento de energia elétrica do compósito. Assim, dentro das condições avaliadas, a componente real da permissividade apresentou baixa sensibilidade às diferentes condições de processamento sob pressão de vácuo.

Para as amostras processadas sob diferentes níveis de pressão negativa, observa-se que a maioria das curvas preserva comportamento próximo ao da amostra de referência em cada concentração, com algumas exceções.

Diferenças mais evidentes foram observadas na componente imaginária (ϵ''), associada aos mecanismos de dissipação dielétrica. Na concentração de 50% de FC (Fig. 4a), a amostra 5, processada sob -450 mmHg, apresentou valores próximos de $\epsilon'' \approx 1$, superiores aos observados para as demais amostras. Esse comportamento indica que a condição de processamento sob maior pressão negativa modificou os mecanismos de dissipação dielétrica do compósito. Embora essas alterações possam estar associadas a modificações microestruturais promovidas durante o processamento, a ausência de caracterização quantitativa da porosidade não permite estabelecer uma correlação direta entre o valor de ϵ'' e a fração, o tamanho ou a distribuição dos poros.

Um fenômeno semelhante foi observado para a concentração de 60% de FC (Fig. 4b), na qual as amostras 2 e 4 apresentaram aumento de ϵ'' na faixa entre 18 e 20 GHz. Esse resultado indica que determinadas condições de processamento podem modificar os mecanismos de dissipação dielétrica em frequências específicas, embora a natureza dessas modificações microestruturais não tenha sido quantitativamente caracterizada no presente estudo.

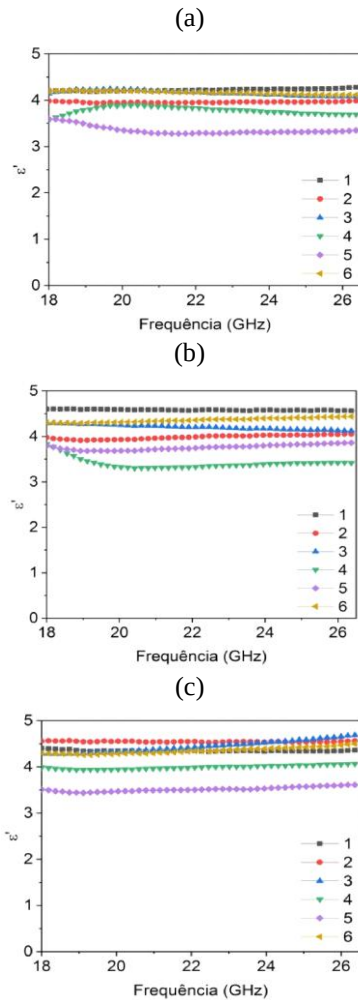


Fig. 3. Permissividade elétrica real, (a) 50%, (b) 60% e (c) 70% de FC no silicone

Entretanto, para a concentração de 70% de FC (Fig. 4c), os valores de ϵ'' permaneceram próximos de zero para praticamente todas as amostras. A elevada concentração de partículas magnéticas parece reduzir a influência relativa das diferentes condições de processamento sobre os mecanismos dielétricos, tornando o comportamento do material predominantemente dependente da resposta associada à FC.

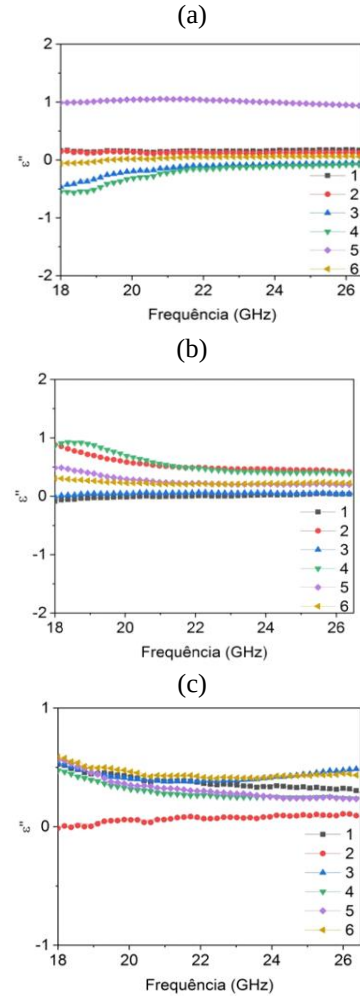


Fig. 4. Permissividade elétrica imaginária, (a) 50%, (b) 60% e (c) 70% de FC no silicone.

B. Análise relativa à permeabilidade magnética

A Fig. 5 apresenta os resultados da permeabilidade magnética. Observa-se que as amostras seguiram um comportamento muito próximo ao da amostra de referência para a permeabilidade magnética real em todas as concentrações avaliadas. Contudo, verificou-se um pequeno decréscimo nos valores entre 24 e 26,5 GHz associado a uma possível aproximação da frequência de relaxação magnética das partículas de FC, fenômeno frequentemente observado em materiais absorvedores baseados em partículas ferromagnéticas. Além disso, a amostra 2 (-150 mmHg) foi a que apresentou as maiores variações em função da mudança de concentração.

(a)

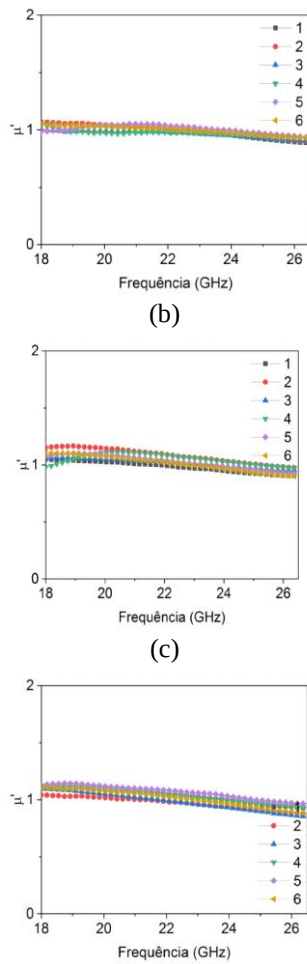


Fig. 5. Permeabilidade magnética real, (a) 50%, (b) 60% e (c) 70% de FC no silicone

A análise da componente imaginária da permeabilidade (μ''), apresentada na Fig. 6, revela diferenças mais expressivas entre as amostras. Para as concentrações de 50% (Fig. 6a) e 60% (Fig. 6b), observam-se aumentos localizados de μ'' na região entre 18 e 20 GHz, indicando intensificação das perdas magnéticas. Esse comportamento demonstra que as diferentes condições de processamento sob pressão de vácuo podem influenciar os mecanismos de perdas magnéticas. Modificações microestruturais promovidas durante o processamento constituem uma possível explicação para esse efeito. Entretanto, na ausência de caracterização quantitativa da estrutura de poros, não é possível atribuir diretamente as variações observadas ao aumento do espalhamento provocado por interfaces porosas.

Na concentração de 70% (Fig. 6c), observa-se o comportamento mais pronunciado. A amostra 2 (-150 mmHg) apresentou os maiores valores de μ'' , enquanto a amostra 5 (-450 mmHg) apresentou valores mais próximos da referência. Esse resultado sugere a existência de uma condição de processamento capaz de favorecer a interação entre a onda eletromagnética e os mecanismos magnéticos de absorção. Porém, como a porosidade das amostras não foi quantitativamente caracterizada, não é possível estabelecer

uma relação direta entre o nível de pressão aplicado, a quantidade de poros e as variações observadas em μ'' .

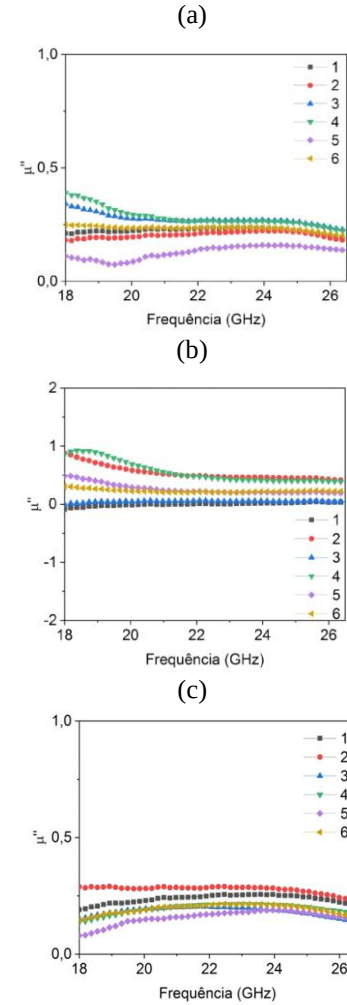


Fig. 6. Permeabilidade magnética imaginária, (a) 50%, (b) 60% e (c) 70% de FC no silicone

De forma geral, os resultados indicam que as diferentes condições de processamento sob pressão de vácuo não modificam significativamente a forma das curvas de permeabilidade, mas influenciam principalmente a componente imaginária associada aos mecanismos de dissipação de energia.

C. Performance de absorção eletromagnética

Os resultados de RL obtidas em guia de onda, apresentados na Fig. 7, demonstram que as diferentes condições de processamento sob pressão de vácuo influenciam o desempenho absorptivo dos compósitos. Diferentemente das propriedades constitutivas analisadas anteriormente, pequenas variações em ϵ'' e μ'' produzem alterações significativas no mecanismo de casamento de impedância do material com o espaço livre, refletindo diretamente nos valores de RL.

Para a concentração de 50% de FC (Fig. 7a), a amostra processada sob -350 mmHg apresentou o melhor desempenho

em guia de onda retangular, atingindo $RL = -28,42$ dB em 26,5 GHz, correspondendo à absorção de aproximadamente 99,86% da potência incidente, indicando elevado potencial de aplicação como absorvedor eletromagnético.

Na concentração de 60% de FC (Fig. 7b), a condição ótima ocorreu para a amostra processada sob -150 mmHg. O desempenho superior observado nessa composição sugere que a combinação entre a concentração de carga magnética e a condição de processamento sob -150 mmHg favoreceu um melhor equilíbrio entre permissividade, permeabilidade e impedância característica do material.

Para a concentração de 70% de FC (Fig. 7c), a amostra processada sob -350 mmHg voltou a apresentar os menores valores de RL, evidenciando que o uso da pressão negativa controlada pode atuar como um mecanismo adicional de otimização da absorção eletromagnética mesmo em sistemas altamente carregados magneticamente.

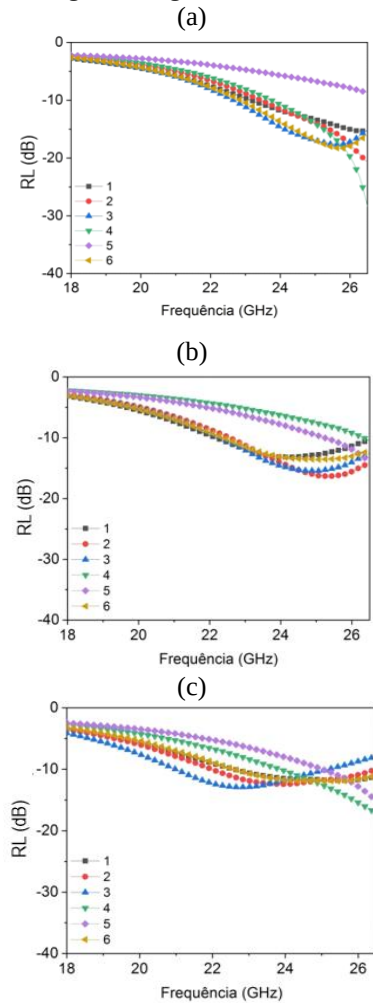


Fig. 7. Relação de RL na Banda K para a amostra de (a) 50%, (b) 60% e (c) 70% de FC no silicone, medido em guia de onda retangular.

Com base na Fig. 7, observa-se uma mudança do comportamento das curvas de RL em função das diferentes condições de processamento. Uma possível interpretação para esse comportamento envolve modificações microestruturais

capazes de alterar o caminho percorrido pela onda eletromagnética no interior do material. Em estruturas contendo vazios ou cavidades, descontinuidades entre a matriz sólida e o ar podem favorecer processos de espalhamento múltiplo e difração local, alterando a trajetória retilínea da radiação.

A Fig. 8 apresenta uma representação esquemática do perfil de propagação eletromagnética em uma matriz compósita idealmente homogênea e em uma estrutura contendo cavidades. O esquema tem caráter conceitual e ilustra um possível efeito de modificações microestruturais sobre a distribuição dos campos e sobre os processos de espalhamento interno, não constituindo uma representação quantitativa da morfologia das amostras produzidas neste estudo.

Conceitualmente, em uma estrutura homogênea (Fig. 8a), a propagação da onda tende a ocorrer por um caminho mais direto, enquanto a presença de cavidades (Fig. 8b) pode introduzir interfaces adicionais capazes de favorecer reflexões internas e espalhamento da onda, promovendo uma conversão eficiente da energia incidente em energia térmica. Ressalta-se, entretanto, que os mecanismos de espalhamento múltiplo, aumento do caminho efetivo de propagação e polarização interfacial aqui discutidos constituem interpretações consistentes com o comportamento eletromagnético observado e com os mecanismos reportados na literatura [8]. Como não foi realizada caracterização microestrutural direta das amostras neste estudo, tais mecanismos não podem ser confirmados de forma conclusiva, devendo ser considerados como hipóteses para explicar as tendências experimentais observadas.

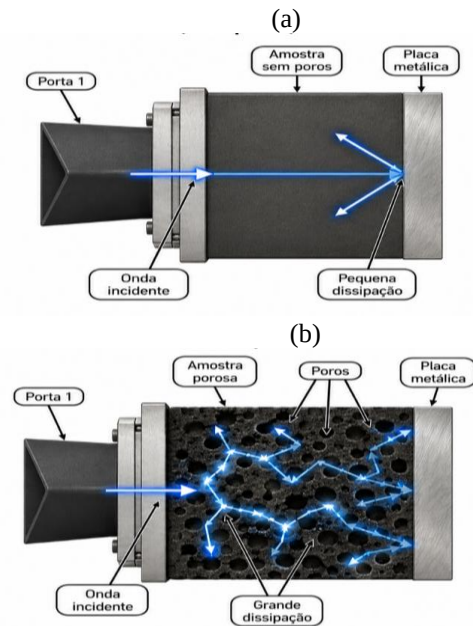


Fig. 8. Representação esquemática e conceitual da propagação da onda eletromagnética em (a) meio homogêneo e (b) meio contendo cavidades.

D. Análise comparativa entre testes em Guia de Onda e Espaço livre

Para validar o desempenho do compósito em cenários de aplicação prática, a Fig. 9 apresenta a correlação dos valores de RL da amostra de 60% de FC submetida à pressão de -50 mmHg obtidos por meio de dois métodos de caracterização. O primeiro método consiste na medição em guia de onda (modo TE₁₀) enquanto o segundo utiliza o método espaço livre (modo TEM).

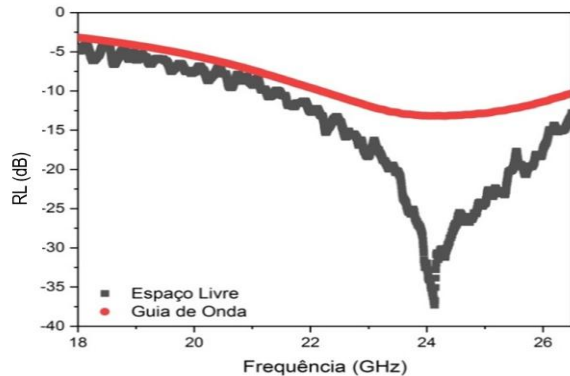


Fig. 9. Relação de RL na Banda K para a amostra de 60% FC e pressão de -50 mmHg, em guia de onda e espaço livre.

A curva vermelha, resultante da medição em guia de onda, exibe um vale de atenuação moderado e relativamente raso na região central da banda K. Em contraste, o ensaio realizado em espaço livre, a linha cinza, que representa de forma mais fiel as condições reais de operação, revela um desempenho absorptivo significativamente superior. Nesse método, a mesma amostra apresenta uma curva de atenuação profunda, alcançando um pico de refletividade de -37,33 dB na frequência de 24,13 GHz. Este valor corresponde à atenuação de aproximadamente 99,98% da energia eletromagnética incidente, evidenciando a elevada eficácia do material em ambientes de propagação aberta.

O desempenho alcançado mostra competitivo frente aos resultados reportados na literatura para a banda K. Enquanto pesquisas recentes empregam sínteses nanoestruturadas complexas, como nanocompósitos de carbono e ferrita [1], derivados de MOFs [2] e nanotubos [3], o presente estudo demonstra que compósitos convencionais à base de silicone e FC, submetidos a condições controladas de pressão durante o processamento, podem alcançar elevados níveis de atenuação eletromagnética. A abordagem destaca-se pela originalidade, oferecendo uma rota de manufatura mais simples, escalável e de menor custo operacional em substituição a processos químicos avançados.

IV. CONCLUSÃO

Este trabalho avaliou a influência de diferentes condições de pressão de vácuo aplicadas durante o processamento de compósitos absorvedores à base de silicone e FC para aplicação na banda K (18–26,5 GHz). Os resultados demonstraram que as diferentes condições de pressão negativa aplicadas durante o processamento não alteraram significativamente as componentes reais da permissividade elétrica e da permeabilidade magnética, mas produziram variações em suas componentes imaginárias, associadas aos mecanismos de dissipação eletromagnética.

A análise da perda por reflexão evidenciou que níveis intermediários de pressão negativa proporcionaram melhor desempenho absorptivo, indicando a existência de condições de processamento capazes de favorecer a absorção eletromagnética.

A técnica de processamento sob pressão de vácuo empregada neste estudo mostrou-se uma estratégia simples para modificar a resposta eletromagnética dos compósitos, proporcionando resultados expressivos de atenuação por meio de uma rota de fabricação relativamente simples.

Os melhores resultados em guia de onda foram obtidos para as amostras com 50% e 70% de FC processadas sob -350 mmHg, com RL de -28,42 dB, enquanto os ensaios em espaço livre apresentaram refletividade máxima de -37,33 dB em 24,13 GHz para a formulação com 60% de FC, correspondendo a 99,98% de atenuação da energia incidente.

Dessa forma, o uso de diferentes condições de pressão durante o processamento combinado a diferentes concentrações de FC mostrou-se uma estratégia eficiente para otimizar a absorção eletromagnética, tornando os compósitos desenvolvidos promissores para aplicações em telecomunicações, compatibilidade eletromagnética, sistemas aeroespaciais e de defesa.

REFERÊNCIAS

- [1] CHAUDHARY, Deepti et al. Synthesis of a lightweight and dual-band (K and Ka-band) microwave absorber based on cobalt ferrite/mesoporous carbon nanocomposite for stealth technology. *Ceramics International*, v. 51, n. 1, p. 1115-1123, 2025.
- [2] YAMAMOTO, Felipe M. et al. Synthesis of nanoparticles of Fe, Co, and Ni oxides derived of metal–organic framework (MOF), and their combination with carbonyl iron for application in the K-band of frequencies as a microwave-absorbing material. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, v. 37, n. 7, p. 504, 2026.
- [3] DOGARI, Haniyeh; GHAFURI, Hossein; PEYMANFAR, Reza. Ultrathin Microwave Absorbing Structures at the K-Band From PDA-Implanted CNTs, Doped Conjugated Carbon Using Peganum Harmala Seeds and Turpentine Derivatives. *Advanced Sustainable Systems*, v. 9, n. 2, p. 2400793, 2025.
- [4] ZHAO, Chao et al. Ultra-wideband optically transparent flexible metamaterial absorber for satellite stealth. *Scientific Reports*, v. 15, n. 1, p. 29093, 2025.
- [5] BELOUS, Anatolii et al. Composite Microwave-Absorbing Materials with Magnetic Constituents: State-of-the-Art and Possible Ways for Improving their Parameters. *Advanced Engineering Materials*, v. 28, n. 3, p. e202502088, 2026.
- [6] SIDDIKI, Salim H.; MAITY, Chandan Kumar; SAHOO, Sumanta. Advances in microwave-absorbing materials: from fundamentals to emerging technologies. *Journal of Materials Chemistry A*, v. 13, n. 38, p. 31869-31920, 2025.
- [7] Feng, Y. B., Qiu, T., Shen, C. Y., & Li, X. Y. (2006). Electromagnetic and absorption properties of carbonyl iron/rubber radar absorbing materials. *IEEE Transactions on Magnetics*, 42(3), 363–368.
- [8] HOFMANN, Willi; SCHWIND, Andreas; BORNKESSEL, Christian; HEIN, Matthias A. Bi-static reflectivity measurements of microwave absorbers between 2 and 18 GHz. In: *Antenna Measurement Techniques Association Symposium (AMTA)*, 2021, Ilmenau. Proceedings [...] IEEE, 2021. p. 1-5.