

# Estudo do potencial de atenuação eletromagnético de compósitos híbridos a base de ferrita de cobre e titânio na banda Ka – Parte II

Mariana Helena de Oliveira Antunes<sup>1</sup>, Braulio Haruo Kondo Lopes<sup>2</sup>, Chen Ying An<sup>2</sup>, Mauricio Ribeiro Baldan<sup>2</sup>, Felipe Yamamoto<sup>2</sup>, Giovana Cembranelli<sup>2</sup>, Vitor Yamamoto<sup>3</sup>, Viviane Lilian Soethe<sup>4</sup>, Kemmely Guedes<sup>4</sup>

1 - Faculdade de Tecnologia - São José dos Campos - Prof. Jessen; 2 - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais; 3 – Instituto Federal de São Paulo; 4 – Universidade Federal de Santa Catarina

**Resumo** — A busca por materiais absorvedores de radiações eletromagnéticas (MARE) para os setores de defesa têm crescido. O presente trabalho tem como foco o desenvolvimento de compósitos híbridos para aplicações como MARE. O potencial de atenuação foi calculado através de simulações e proporcionou analisar efeito da variação de espessura das amostras junto à variação do material sintetizado na faixa de frequência referente à banda Ka, que compreende de 26,5 GHz à 40GHz. A simulação das espessuras foi realizada pelo software FEKO, utilizando propriedades de permissividade e permeabilidade de 3 amostras com matriz dielétrica de borracha de silicone e diferentes dopantes sintetizados a base de ferrita de cobre e titânio na proporção de 60% em massa de aditivo magnético. Os resultados demonstraram aceitável desempenho para MARE de até 99,99% de absorção em 37,1 GHz a partir das simulações realizadas.

## I. INTRODUÇÃO

No setor militar, a tecnologia stealth tem ganhado destaque e se tornou cada vez mais essencial devido à sua capacidade de tornar objetos, como mísseis e aeronaves, invisíveis aos radares. Recentemente, essa tecnologia tem sido integrada também aos uniformes militares, com o objetivo de aumentar a sobrevivência em combate [1-2]. A banda Ka, cujo funcionamento é de 26,5 à 40 GHz, vem sendo muito utilizada para comunicação de satélites e radares militares [3-4]. Assim como a tecnologia de radares vem se reinventando para detecção de alvos, os materiais absorvedores de radiação eletromagnética (MARE) precisam continuar em constante evolução para acompanhar o avanço tecnológico dos radares. A fim de diminuir o alcance de detecção dos radares, a literatura indica que é possível a fabricação desses compósitos a partir de um material dielétrico, como matriz e dopantes, como aditivos elétricos e magnéticos [5-6]. Neste trabalho foi utilizada a matriz de borracha de silicone para facilitar a manufatura do compósito híbridos e dopante a base de ferritas de cobre e titânio. Para a caracterização eletromagnética foi utilizado um Analisador de redes vetorial para calcular os valores de permissividade elétrica complexa e permeabilidade magnética complexa através do modelo matemático NRW. E, foi realizado o ensaio de refletividade em conjunto com simulações na variação da espessura das amostras no software FEKO da Altair®, para o estudo do potencial de atenuação eletromagnética do material na banda Ka.

## II. METODOLOGIA

### A. Síntese da ferrita e caracterização morfológica

Os dopantes utilizados foram: nitrato de ferro III, como agente precursor da ferrita e, foram adicionados o nitrato de cobre III e óxido de titânio para melhor análise do comportamento da absorção das ondas eletromagnéticas no material.

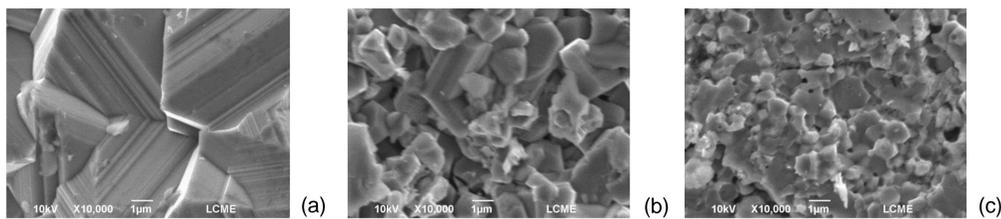


Fig. 1. Imagem MEV das ferritas de cobre e titânio, na sequência (a) amostra 1, (b) amostra 2 e (c) amostra 3.

### B. Desenvolvimento do Material Compósito Híbrido

Foram feitas 3 amostras referentes a cada ferrita desenvolvida no presente trabalho e sua descrição esta apresentada na Tabela I.

Tabela I – Descrição das Amostras

73%Fe(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> + 13%TiO <sub>2</sub> + 13%Cu(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Amostra 1
57%Fe(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> + 21%TiO <sub>2</sub> + 21%Cu(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Amostra 2
44%Fe(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> + 28%TiO <sub>2</sub> + 28%Cu(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Amostra 3

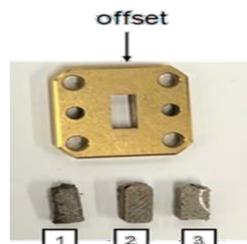


Fig. 3. Amostras e offset Ka.

Material do estudo + Matriz dielétrica

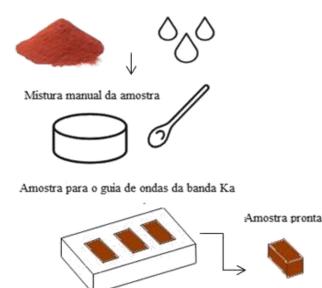


Fig. 2. Ilustração da produção da amostra



Fig. 4. Kit Banda Ka.



Fig. 5. Analisador de Redes Vetorial

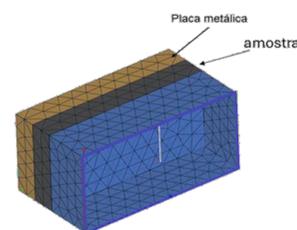


Fig. 6. Setup do guia de onda da banda ka no FEKO.



Fig. 7. Silicone.

## III. RESULTADOS

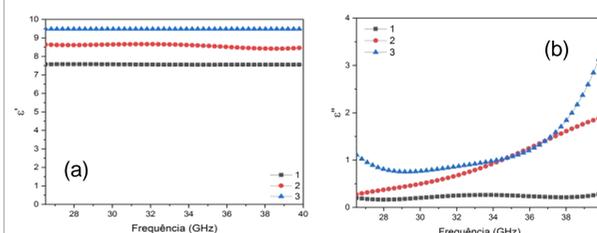


Fig. 8. Gráficos de  $\epsilon'$ ,  $\epsilon''$ , (a) Gráfico de  $\epsilon'$ , (b) Gráfico de  $\epsilon''$

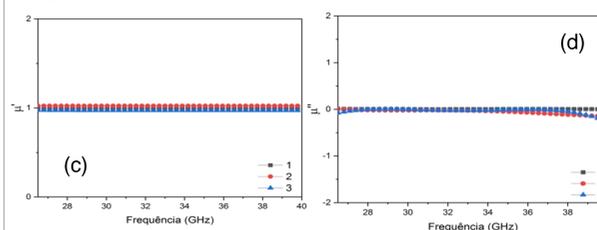


Fig. 9. Gráficos de  $\mu'$  e  $\mu''$ , (a) Gráfico de  $\mu'$ , (b) Gráfico de  $\mu''$

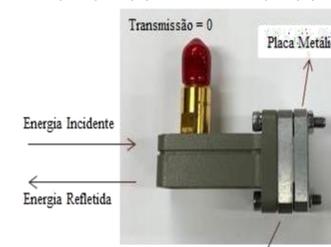


Fig. 10. Configuração ensaio de RL.

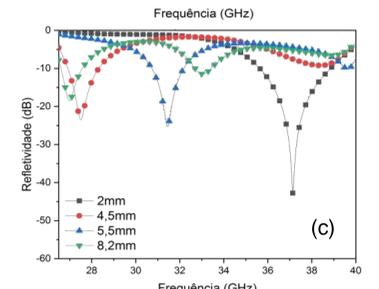
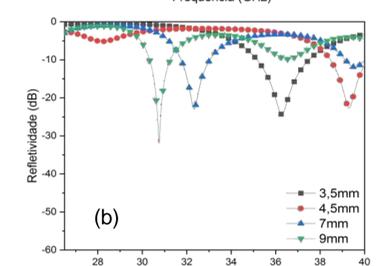
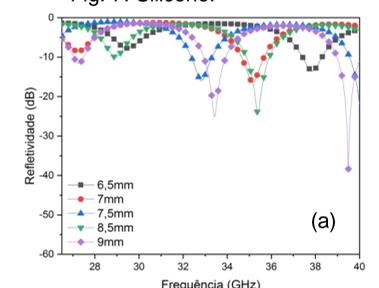


Fig. 11. Gráfico de refletividade dos resultados simulados, das (a) amostra 1, (b) amostra 2 e (c) amostra 3.

## IV. CONCLUSÃO

Conforme as imagens reproduzidas pelos gráficos, é possível concluir que os melhores resultados se encontram na amostra 3, em que apresenta menor quantidade de ferro e maior quantidade de cobre e titânio, atingindo um pico de refletividade de -44dB em 37,1 GHz para a amostra de 2mm de espessura, o que implica cerca de 99,99% de absorção eletromagnética. Assim, o presente trabalho demonstrou que a aplicação deste material como MARE para a banda Ka tem futuro, no entanto, para obter melhores resultados, é necessária a realização de mais estudos a fim de aumentar o potencial de atenuação eletromagnética nesta faixa de frequência para que este material possa abranger as mais diversas aplicações.

## REFERÊNCIAS

- [1] Richter, R.; Gonçalves, D.; Gomes, N. "Effect of combat textile cloth on human radar cross section for microwave camouflage applications." (2023). The Journal of Defense Modeling and Simulation, v. 20, n. 3, p. 415-422.
- [2] Xing, Z., Yang, F., Yang, J., & Zhu, X. (2023). "Low-RCS Ka-band receiving and transmitting satellite communication antennas co-designed with high-performance absorbent frequency-selective radomes." Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 37(2), 190-206.
- [3] Przybył, Wojciech, et al. "Microwave absorption properties of carbonyl iron-based paint coatings for military applications." Defence Technology 22 (2023): 1-9.
- [4] Hu, Ran, et al. "Thermal aged parameters characteristics of cables crosslinked polyethylene and accessories silicone rubber materials." Science of Advanced Materials 15.9 (2023): 1174-1184.
- [5] Shu, Ruiwen, et al. "Fabrication of bimetallic metal-organic frameworks derived Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/C decorated graphene composites as high-efficiency and broadband microwave absorbers." Composites Part B: Engineering 228 (2022): 109423.
- [6] Klygach, D. S., et al. "Magnetic and microwave properties of carbonyl iron in the high frequency range." Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 490 (2019), 165493. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.165493>.