



ABSORVEDORES MULTICAMADAS A BASE DE NEGRO DE FUMO E CARBETO DE SILÍCIO NA FAIXA DE FREQUENCIA DE 12,4 – 18GHz (Banda Ku)

SOUZA, A.A.T.^{1*}, MEDEIROS, N.C.F.L.^{1,3}, MEDEIROS, L.L.^{1,3}, SILVA, G. F. B. L.², BOSS, A.F.N.², LENZ e SILVA, G. B. F.², BALDAN, M.R.¹

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil

*Aluno de Mestrado do curso de Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores - CMS.

²Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil

³Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilhéus, Bahia, Brasil

ariane_apt@hotmail.com

Resumo. *Materiais Absorvedores de radiação eletromagnética são compósitos usados como soluções de problemas de interferência eletromagnética. Estes materiais podem ser encontrados em sua estrutura mais simples (monocamadas) ou em estruturas mais complexas (multicamadas). Neste estudo, é apresentado a influência que a composição dos materiais tem nas medidas de refletividade de estruturas multicamadas. Amostras de Negro de fumo (NF), silicone puro (S) e Carbetto de Silício (SiC) foram combinadas em camadas para atuarem na Banda Ku (12,4 – 18 GHz). Foram caracterizadas diferentes concentrações dos compósitos de SiC (30 wt%, 40 wt% e 50 wt%) e NF (0.5 wt% ; 1 wt%; 1.5 wt% e 2wt%), com espessuras de 1 a 6 mm. Com o valor da permissividade, foi possível avaliar teoricamente os compósitos como uma estrutura multicamada. das amostras avaliadas. As estruturas multicamadas que apresentaram os melhores resultados foram validadas experimentalmente utilizando um analisador de rede vetorial (VNA). No melhor resultado, a disposição das amostras são NF+S+SiC, totalizando 6,5 mm de espessura e -39 dB de refletividade.*

Palavras-chave: Multicamadas; banda Ku; Material absorvedor.

1. Introdução

Recentemente, materiais absorvedores de radiação eletromagnética (MAREs) têm despertado maior atenção da comunidade científica devido ao aumento de problemas de compatibilidade e interferência eletromagnética. Estes materiais são, também, partes essenciais na área da defesa, abrangendo todas as plataformas militares como blindagem de equipamentos eletrônicos[1], radomes, tecnologia *stealth* [2], entre outros [3,4]. Logo, muitos tipos de materiais capazes de blindar a radiação eletromagnética foram desenvolvidos ao longo do tempo, tais como: materiais monocamadas [5]; multicamadas [6]; superfície seletora de frequência [7]; entre outros. No entanto, uma estrutura versátil para o controle da refletividade têm sido as materiais multicamadas [8], que consiste na junção de camadas de diferentes materiais acoplados ao longo do material.



Normalmente, os MAREs são compósitos feitos com um material polimérico (matriz) e um material absorvedor (aditivo). Esses aditivos são materiais com perdas dielétricas e/ou magnéticas como, por exemplo, a ferrita, a ferro carbonila, materiais carbonosos e polímeros condutores [9].

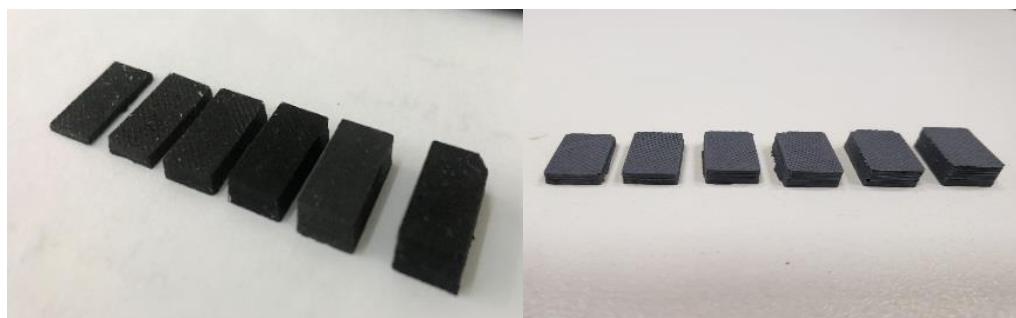
Para a medidas das propriedades dielétricas intrínsecas dos materiais a serem analisados, é utilizado um guia de ondas acoplado em um analisador de rede vetorial (*Vector Network Analyzer - VNA*). A partir dos parâmetros de espalhamento (parâmetros-S), são calculadas a permissividade, a permeabilidade e a refletividade dos materiais [10]. As análises eletromagnéticas foram investigadas na faixa de frequência de 12,4 a 18 GHz.

Assim, este trabalho tem como principal objetivo produzir e caracterizar compósitos de diferentes materiais com perdas dielétricas para estudo da influência da absorção de radiação eletromagnética em estruturas multicamadas.

2. Metodologia

A. Materiais Utilizados

Para a produção das amostras, foram utilizados Negro de Fumo (NF) e Carbetto de Silício (SiC) como material aditivo e borracha de silicone comercial como matriz polimérica. Para explorar a capacidade de absorção dos materiais em multicamadas os aditivos foram adicionados à matriz de silicone para produção dos compósitos com diferentes concentrações em massa. Primeiramente, foram produzidas amostras brancas, utilizando somente silicone. Para a produção de amostras com os aditivos dielétricos, foram misturadas as amostras com 0,5 wt%, 1 wt%, 1,5 wt% e 2 wt% de NF na matriz. Após a cura das amostras de NF, foi repetido o mesmo procedimento para as amostras de SiC com concentrações de 30 wt%, 40 wt% e 50 wt% de SiC. Os aditivos foram misturados manualmente na matriz polimérica durante 30 segundos, deixando o material homogêneo. Posteriormente, foi adicionado o agente de cura (catalisador), e o compósito foi misturado novamente por cerca de 30 segundos, sendo em seguida despejado no molde com dimensões de 15,7 x 7,9 mm. As amostras ficaram nos moldes em temperatura ambiente durante 24 horas, até que estivessem completamente curadas. Após o processo de cura do material, as amostras foram retiradas cuidadosamente e levadas para análise eletromagnética. A Figura 1 apresenta as amostras de NF e SiC com seis espessuras diferentes, entre 1 e 6 mm.



(a)

(b)



Figura1. Geometria das amostras (a) NF (b) SiC

B. Caracterização Eletromagnética

A caracterização eletromagnética das amostras com diferentes concentrações em massa de NF e SiC foram feitas através de um *setup* para análise em banda K_u. Este *setup* consiste em um guia de ondas retangular, que opera na faixa de frequência entre 12,4 e 18 GHz (Keysight WR-62 P11644A), acoplado a um analisador de rede vetorial PNA-L de 2 portas (Keysight N5232A), Figura 2.



Figura 2 – Guia de ondas acoplado ao analisador de rede vetorial

Para as medidas de refletividade, o material de referência utilizado é uma placa metálica 100% refletora, ou seja, 0% absorvedor. As amostras em multicamadas foram caracterizadas através do VNA em diferentes disposições. No qual, as amostras foram enfileiradas para que o sinal emitido por S1, seja refletido na placa metálica e computado por S2 para o cálculo da refletividade. A configuração da medida de refletividade do sistema em multicamadas pode ser representada na figura 3.

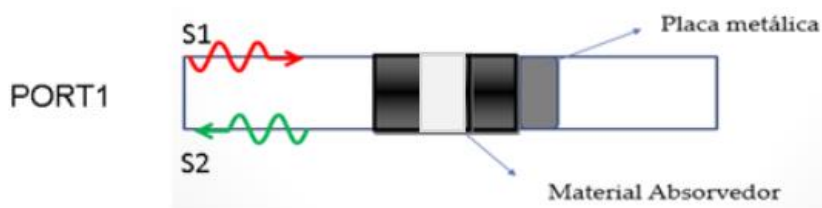


Figura 3. Representação da configuração da medida de refletividade em camadas

Com as medidas de permissividade (ϵ) e permeabilidade (μ) complexas dos materiais obtidas no VNA, foi feita uma rotina de cálculos para materiais multicamadas com base na teoria de transmissão para estudo do material combinado em camadas com o para melhorar da capacidade absorvedora dos compósitos a partir da fórmula a seguir [11].

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



$$z_{in_2} = jz_3 \operatorname{Tanh}\left[(2\pi f d_1)\sqrt{\mu_3 \varepsilon_3}\right] \quad (2)$$

$$z_{in_1} = (Z_2) \frac{z_{in_2} + z_2 \operatorname{Tanh}\left[j(2\pi f \frac{d_2}{c})\sqrt{\mu_2 \varepsilon_2}\right]}{z_2 + z_{in_2} \operatorname{Tanh}\left[j(2\pi f \frac{d_2}{c})\sqrt{\mu_2 \varepsilon_2}\right]} \quad (3)$$

$$z_{in} = (Z_1) \frac{z_{in_1} + z_1 \operatorname{Tanh}\left[j(2\pi f \frac{d_1}{c})\sqrt{\mu_1 \varepsilon_1}\right]}{z_1 + z_{in_1} \operatorname{Tanh}\left[j(2\pi f \frac{d_1}{c})\sqrt{\mu_1 \varepsilon_1}\right]} \quad (4)$$

$$z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} = 377,76 \text{ ohms} \quad (5)$$

$$z_n = \sqrt{\frac{\mu_n}{\varepsilon_n}} \quad (6)$$

onde z_{in} é a impedância de entrada no espaço livre e interface de material; z_{in_1} e z_{in_2} é a impedância de entrada entre as camadas do sistema; Z_0 , Z_1 , Z_2 e Z_3 representam a impedância das características de um vácuo, a primeira camada, a segunda camada, e a terceira camada respectivamente, representada na figura 4; n representa as camadas do sistemas; ε é a permissividade complexa relativa; μ é a permeabilidade complexa relativa. Sendo d a espessura da camada, c a velocidade da luz espaço livre, e f é a frequência da onda eletromagnética (em) no espaço livre.

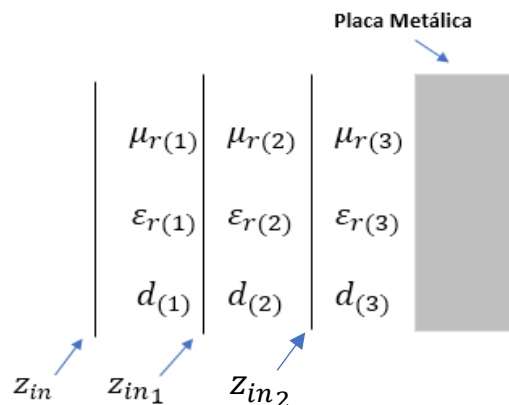


Figura 4. Representação do sistema multicamadas

3. Resultados e Discussão

Com os resultados de permissividade real e imaginária (ε' e ε'') e o resultado de permeabilidade real e imaginária (μ' e μ''), considerando os materiais dielétricos ($\mu' = 1$ e



$\mu'' = 0$) foi calculado a refletividade ou capacidade de absorção do sistema em camada como citado no item anterior. Com os valores de ϵ' e ϵ'' representada na Figura 7.

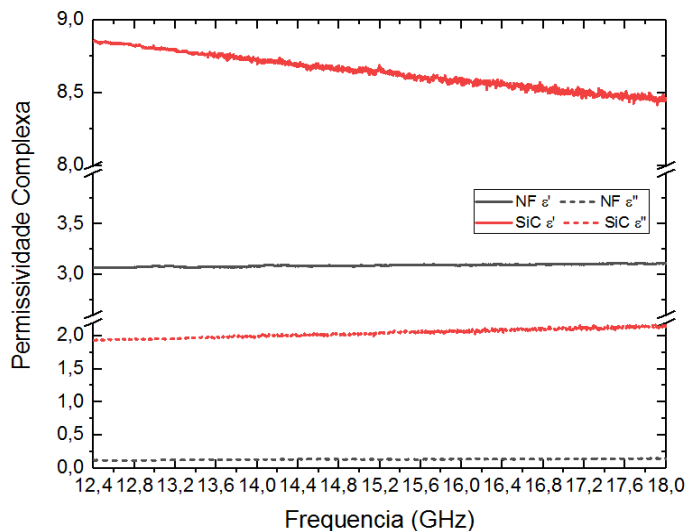


Figura 7. Permissividade complexa das amostras 1 wt% de NF e 50 wt% SiC

As amostras com baixa concentração de NF não apresentaram um bom potencial de absorção de radiação eletromagnética. De acordo com a literatura as amostras com 5 wt% de concentração em massa apresentam mais de 90 % de absorção eletromagnética (>- 10 dB) [12, 13]. As pequenas composições de Negro de fumo utilizadas no processamento das amostras absorvedoras que podem ser observadas na Figura 6, passaram por análises no VNA e as amostras de 1% se destacam, possuindo maior capacidade absorvedora quando combinamos o sistema em camadas. Já as amostras com espessura de 1,97 mm com 50% de SiC apresenta absorção de -10 dB em monocamada, Figura 6.

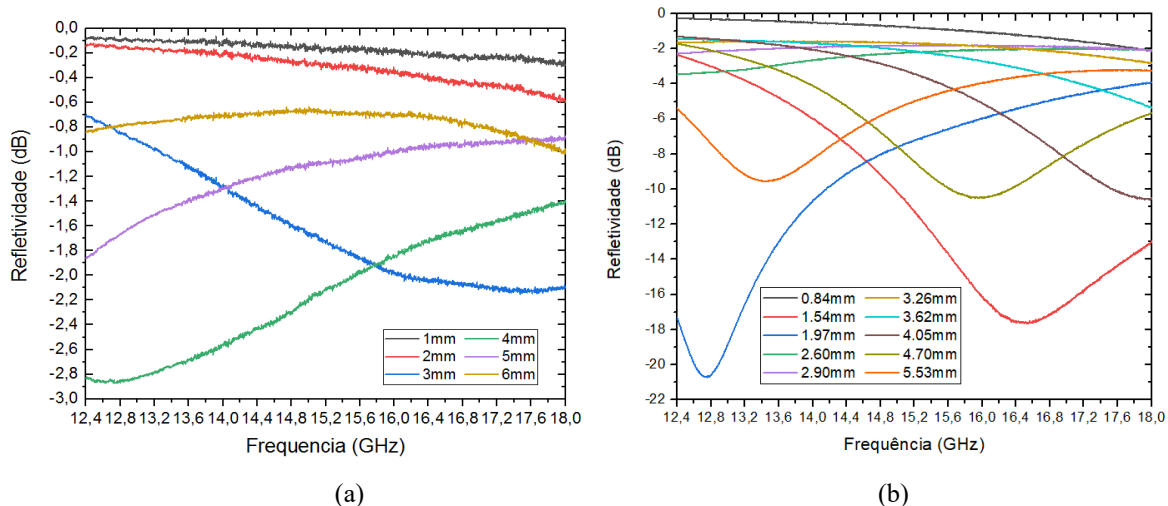


Figura 6. Refletividade das amostras com (a) 1 wt% de NF e (b) 50 wt% SiC

Foi usado as mesmas amostras para estudo do comportamento do sistema multicamada em relação ao potencial de absorção eletromagnética. Quando se coloca as amostras em



multicamadas (enfileiradas uma ao lado da outra, como na representação na figura 4 as medidas apresentam maior potencial de absorção em comparação com as amostras medidas separadamente, Figura 8.

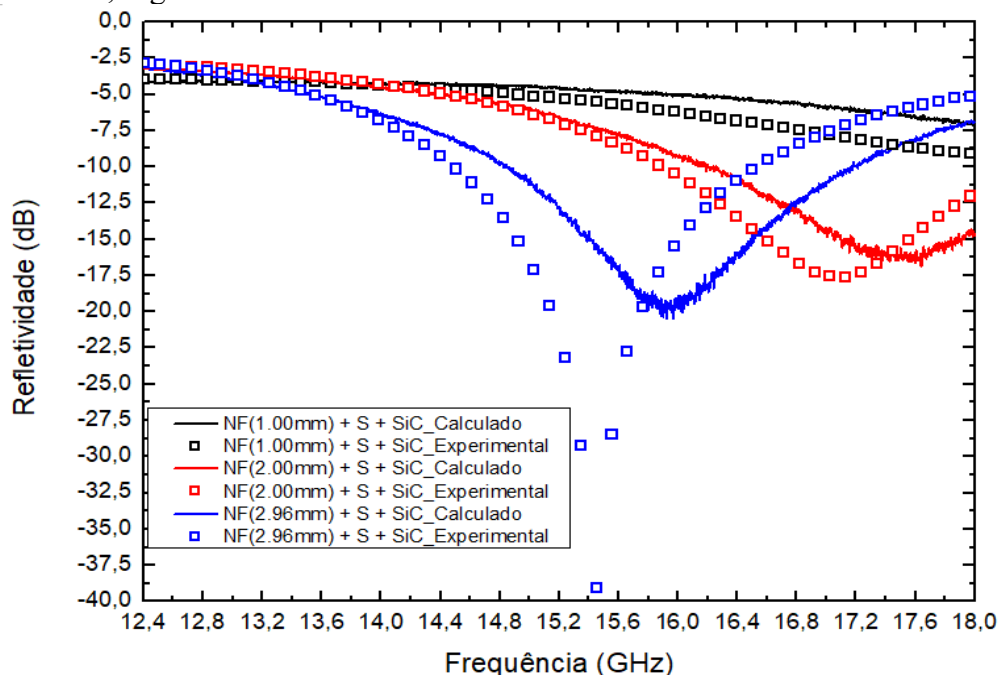


Figura 8. Resultado experimentais e calculados para o sistema Multicamada utilizando camada de diferentes espessuras de negro de fumo em conjunto com as camadas de 1,65 mm de Silicone e 1,97 mm de SiC.

A partir de 14,5 GHz o sistema em camadas está acima da frequência de corte (-10 dB). O efeito multicamada é eficiente em maior parte da banda K_u e apresenta um pico de -39 dB em 15,5 GHz. Para validar o experimento foi calculado os valores de refletividade com a rotina de cálculo citada no item anterior. Podemos observar no gráfico na Figura 8, os cálculos com as mesmas características de absorção que as medidas feitas no VNA. As frequências em que se tem índice de absorção eletromagnética são parecidas, mas com a intensidade do pico de -20dB no cálculo.

4. Conclusão

As amostras de Negro de Fumo em monocamadas não apresentam boa absorção de radiação eletromagnética, mas quando combinadas em multicamadas com silicone e SiC pode-se perceber que a absorção se torna constante a partir de 14,5 GHz, absorvendo 99,99% do sinal e em algumas faixas de frequências possuem picos mais intensos, chegando em -39dB. Este pico mais intenso é também maior que os picos do carboneto de Silício quando medidos em monocamada.



Referências

- [1] SALLEH, M. K. et al. Chebyshev multi-layer microwave absorber design. In: **2013 IEEE International RF and Microwave Conference (RFM)**. IEEE, 2013. p. 306-309.
- [2] ZIKIDIS, Konstantinos; SKONDRAS, Alexios; TOKAS, Charisios. Low observable principles, stealth aircraft and anti-stealth technologies. **Journal of Computations & Modelling**, v. 4, n. 1, p. 129-165, 2014.
- [3] Liu X, Zhang Z, Wu Y. Absorption properties of carbon black/silicon carbide microwave absorbers. *Compos Part B* 2011; 42:326e9
- [4] MORGAN, D. A Handbook for EMC Testing and Measurement. London: Institute of Engineering and Technology, 1994, v. 1, 304 p.
- [5] GONG, Y.-X.; ZHOU, Z.-X.; JIANG, J.-T.; ZHAO, H.-J. Design of ultra-wideband microwave absorber effectual for objects of arbitrary shape. **Chinese Physics B**, IOP Publishing, v. 24, n. 12, p. 124101, dec 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088/1674-1056/24/12/124101>>. 165
- [6] Y. Qing, W. Zhou, F. Luo, D. Zhuo, Microwave-absorbing and mechanical properties of carbonyl-iron/epoxy- silicone resin coatings, *J. Magn. Mater.*, vol. 321, pp. 25-28, 2009
- [7] NOHARA, L. E. **Materiais absorvedores de radiação magnética (8-12GHz) obtidos pela combinação de compósitos avançados dielétricos e revestimentos magnéticos**. 220 p. Tese (Doutorado em MARE) — Instituto Tecnológico Aeroespacial (ITA), São José dos Campos, 2003. 1, 16
- [8] K. N. Rozanov, "Ultimate thickness to bandwidth ratio of radar absorbers," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 48, no. 8, pp. 1230– 1234, 2000
- [9] D. Micheli, A. Vricella, R. Pastore, and M. Marchetti, "Synthesis and electromagnetic characterization of frequency selective radar absorbing materials using carbon nanopowders," *Carbon N. Y.*, vol. 77, pp. 756–774, 2014
- [10] DE CASTRO DIAS, Josiane et al. Refletividade de fótons microondas por tintas poliuretânicas aditadas com Ferritas de NiZn e MnZn. **Revista de Física Aplicada e Instrumentação**, v. 18, n. 1, 2005.
- [11] LIU, Yuan; LIU, Xiangxuan; WANG, Xuanjun. Double-layer microwave absorber based on CoFe₂O₄ ferrite and carbonyl iron composites. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 584, p. 249-253, 2014
- [12] BARBA, Anna A. et al. Carbon black/silicone rubber blends as absorbing materials to reduce Electro Magnetic Interferences (EMI). **Polymer Bulletin**, v. 57, n. 4, p. 587-593, 2006.
- [13] JANI, Raj K. et al. Tuning of Microwave Absorption Properties and Electromagnetic Interference (EMI) Shielding Effectiveness of Nanosize Conducting Black-Silicone Rubber Composites over 8-18 GHz. **Progress in Electromagnetics Research M**, v. 58, 2017.