

Estudo de Absorvedores de Micro-ondas com Dupla Camada Aplicados na Banda X

Bruno Donati¹, Nicholas Eras¹, Erick Melo¹, Cecília Corsato¹, Gustavo Souza¹, Luiz Mário Júnior¹, Newton Adriano dos Santos Gomes² e Valdirene Aparecida Silva¹

¹Universidade do Vale do Paraíba (UNIVAP), São José dos Campos/SP - Brasil

²Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos/SP - Brasil

Resumo—O estudo de Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética (MARE) continua sendo uma área de pesquisa relevante em vários países. Esse trabalho contribui no estudo de absorvedores de dupla camada, composto de um material magnético, ferrocarbonila (FC), e outro dielétrico, nanotubos de carbono (NTC), aditados em resina epóxi e avaliados eletromagneticamente na Banda-X (8,2 GHz à 12,4 GHz). O compósito de FC foi preparado nas concentrações de 15%, 20% e 25%, sendo realizado medidas de suas características de reflexão (parâmetro S_{11}) e transmissão (parâmetro S_{21}) bem como perda por refletividade (RL). Uma camada de compósito NTC foi adicionada à uma de FC sendo caracterizado com os mesmos parâmetros medidos. Os resultados obtidos mostram que os MARE com camada dupla apresentam comportamento banda larga e sua eficiência pode ser melhorada com ajustes de concentração e espessura da camada.

Palavras-Chave— Absorvedores de Radiação Eletromagnética, Ferrocarbonila, Nanotubos de Carbono.

I. INTRODUÇÃO

A tecnologia furtiva (*stealth*) pode ser categorizada em dois métodos, o primeiro é o formato da estrutura da aeronave, e o segundo, a partir de materiais absorvedores de radiação eletromagnética (MARE). Estes, são amplamente estudados pela comunidade científica, sua história inicia no período entre guerras com o uso em tanques de guerra por militares russos. Mas foram popularizados com os caças Lockheed F-117 na guerra do Golfo, em 1990 [1].

Devido ao desenvolvimento da tecnologia de radares, dispositivos eletrônicos e comunicação sem fio, os MARE tornaram-se de grande importância, pois a interferência das ondas eletromagnéticas, não só comprometem a saúde humana, mas também, pode interferir nos dispositivos eletromagnéticos de equipamentos civis bem como dos sistemas militares [2]. Os MARE são classificados em dois tipos: os dielétricos e os magnéticos. As ferritas e a ferrocarbonila (FC) são exemplos de MARE magnéticos e os polímeros condutores e materiais carbonosos, como grafeno e nanotubos de carbono (NTC) são exemplos de materiais dielétricos [1]-[2]. O NTC possui um excelente desempenho como absorvedores de radiação eletromagnética em bandas de alta frequência, podendo ter eficiência em frequências mais baixas de acordo com a sua espessura [3]-[4]. Já a FC é um ótimo absorvedor de radiação na banda X [1]. Ao avaliar as características eletromagnéticas da FC e do NTC distintamente, é possível obter uma maior absorção ao juntá-los em um processo de multicamadas.

A absorção da onda eletromagnética por materiais magnéticos ocorre por relaxamento induzido pelo movimento da parede dos domínios magnéticos ou por um mecanismo de

ressonância de rotação natural do *spin*. Quanto aos materiais dielétricos, quando a onda eletromagnética se propaga através do material, movimentos translacionais das cargas livres dos elétrons ou íons são induzidas pelo campo interno gerado, promovendo orientação dos dipolos. Em ambos os casos, a energia da onda é dissipada na forma de calor [4].

No intuito de obter um melhor desempenho, o material absorvedor depende da frequência, da onda incidente e da espessura do material processado e, para que seja considerado ideal, deve satisfazer dois pré-requisitos: (i) a impedância (Z_{in}) correspondente entre o espaço livre e a superfície do material para evitar a reflexão da onda; (ii) para os materiais absorvedores apresentarem absorção da onda eletromagnética incidente, é necessário apresentarem mecanismos de perdas dielétricas e/ou magnéticas dentro dos absorvedores [4]-[5].

Estudos com MARE de duas camadas ou mais são realizados para se obter um absorvedor que atenua a onda eletromagnética numa ampla faixa de frequência (banda larga) [5]. Uma estrutura dupla ou multicamadas, apresenta melhor eficiência na atenuação da micro-ondas do que a camada simples, reduzindo a perda da reflexão e resultando em uma absorção em banda larga. Geralmente, obedece a um design com uma camada de correspondência, que permite a entrada da onda eletromagnética e uma camada absorvedora, que permite o espalhamento da onda [5]-[6].

II. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

A. Materiais

Nesse estudo, foram utilizados ferrocarbonila comercial da empresa Basf Ltda, nanotubos de carbono de paredes múltiplas NANOCYL[®] NC7000[™] da empresa Nanocyl S.A. e a matriz polimérica utilizada foi uma resina epóxi Hexion tipo Epikote[™] MGS[®] L135.

B. Preparação dos MARE

A adição dos absorvedores na matriz polimérica foi realizada por dispersão (m/m). Primeiro, foi construído o MARE com FC em três concentrações: 15%, 20% e 25%, com espessura de 4 mm. Segundo, o MARE preparado com NTC foi feito com 1% e adicionada sobre a camada do absorvedor de FC com 1 mm de espessura na camada e, sendo assim, o absorvedor com espessura de 5 mm, Fig. 1.

C. Medidas Eletromagnética

As medidas dos Parâmetros S e refletividade com placa (RL) foram realizadas na faixa de frequência de 8,2 GHz à

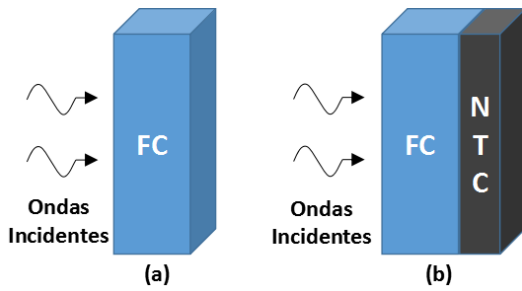


Fig. 1. (a) Estrutura proposta do absorvedor de camada simples. (b) Estrutura proposta do absorvedor de camada dupla.

12,4 GHz, em um guia de onda retangular (kit de calibração WR-90 P11644A - Agilent) acoplado a um analisador de rede vetorial PNA-L, 20 GHz, modelo N5230C.

Os parâmetros de espalhamento S (S_{11} , S_{21} , S_{12} e S_{22}) permitem estudar as interações das ondas eletromagnéticas com a amostra. A capacidade de atenuação da onda eletromagnética por um material absorvedor pode ser expressa em termos da proporção de incidência e de saída da energia da onda eletromagnética. A atenuação depende dos mecanismos de reflexão na superfície do material (S_{11} , S_{22}), absorção da onda que passa através do material (S_{21} , S_{12}) e das múltiplas reflexões da onda nas várias interfaces do material absorvedor [4]. As medidas de refletividade com placa, ou perda por reflexão, foram obtidas utilizando-se uma placa metálica de alumínio, 100% refletora, como anteparo, conforme Fig. 2.

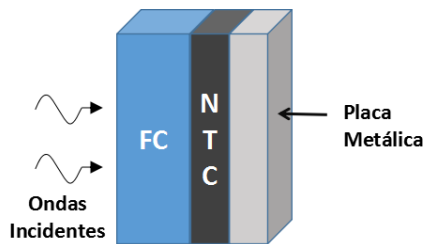


Fig. 2. Modelo de medição da refletividade (RL) utilizando a placa metálica em uma estrutura de multicamadas no interior de um guia de onda.

A capacidade de absorção da onda eletromagnética é indicada pela perda de reflexão (RL) (1) [1].

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

Considerando que Z_{in} corresponde a impedância de entrada na interface da primeira camada em estudo e o ar, uma condição para minimizar a reflexão da onda eletromagnética incidente considerar que Z_{in} seja igual a 1. Nesta condição o material está eletromagneticamente casado com o meio ar tendo uma espessura, para essa condição, de $\lambda/4$ da onda incidente [7].

III. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A. Caracterização Eletromagnética

1) *Parâmetros S*: A reflexão está relacionada ao desacasamento de impedância entre o ar e o material absorvedor quando a frequência da onda incidente possui uma variação no tempo. A absorção pode ser considerada como a energia de dissipação na interação entre micro-ondas eletromagnética

e o absorvedor. As múltiplas reflexões são consideradas como o efeito de espalhamento da falta de homogeneidade nos materiais. Geralmente, o aumento da eficiência de blindagem, em decibéis, representa o aumento do consumo de energia no absorvedor. Por outro lado, o coeficiente de absorção resulta do efeito dielétrico e propriedades magnéticas de materiais [5].

Quando a energia da onda eletromagnética incide sobre um material, a radiação na faixa de micro-ondas pode ter sua energia parcial ou totalmente refletida, absorvida ou transmitida. Na caracterização eletromagnética de materiais, os parâmetros S representam a relação da energia da onda eletromagnética refletida e transmitida pelo material. Esses parâmetros contêm informações sobre as propriedades de espalhamento da onda no material [8].

Para que uma onda eletromagnética circule pela superfície do material absorvedor e se propague em seu interior, deve existir o casamento de impedâncias entre o espaço livre e a primeira superfície do material, onde a onda incide. A impedância representa a resistência que a onda encontra ao penetrar no material. Assim, o valor da impedância da superfície do material absorvedor deve ser igual à impedância do espaço livre ($Z_0 = 377\Omega$) [9].

Quando a energia da onda penetra no material, ocorre o fenômeno de interação onda-matéria, ao nível das estruturas molecular e eletrônica do material, resultando na transformação energia da onda eletromagnética em calor [10]. Na prática, os parâmetros de espalhamento mais citados são os relativos ao S_{11} e ao S_{21} . O parâmetro S_{11} representa o quanto da energia é refletida a partir do material. Quanto mais próximo o valor medido estiver da referência (placa metálica), ou seja, 0 dB, maior é o seu caráter refletor. Quanto maior a diferença do valor medido em relação a referência, menor é a energia que retorna à origem (fonte da onda incidente). O parâmetro S_{21} representa a energia transmitida pelo material. Quanto mais próximo da referência, no caso o ar (material 100% transmissor), estiver o valor de S_{21} medido, maior é a energia transmitida, ou seja, a energia que penetrou no material, irradiada da porta 1, que se propagou pelo material e foi detectada na porta 2 [9]. Os gráficos da Fig. 3, 4 e 5 apresentam as curvas das medidas dos parâmetros S . Foram realizadas medidas do absorvedor com a camada simples de FC (com 15%, 20% e 25% m/m de FC) e com a dupla camada FC/NTC (com 1% NTC m/m), sendo seus resultados comparados. Na Fig. 3, as curvas de reflexão e transmissão da onda (S_{11} e S_{21}), mostram que a adição de uma camada de um absorvedor dielétrico, neste caso o NTC, resultou em um aumento no parâmetro de transmissão, que variou de -5 dB a -8 dB, mantendo-se com o aumento da concentração de FC no MARE, Fig. 4 e Fig. 5. O parâmetro de reflexão (S_{11}) mostra que o MARE com dupla camada FC/NTC apresentou um aumento, em torno de -22 dB, sendo a curva deslocada para dentro da faixa de frequência estudada, como pode ser observado nas Fig. 4 e 5. A curva mostra um comportamento ressonante do composto em camada dupla. Este comportamento pode estar relacionado com a espessura da camada de NTC no composto. Nanotubos de carbono apresentam comportamento absorvedores mais eficientes em faixas de frequências altas, sendo necessário aumentar a espessura para que se tenha maior eficiência na faixa de frequência da banda X [11]-[12].

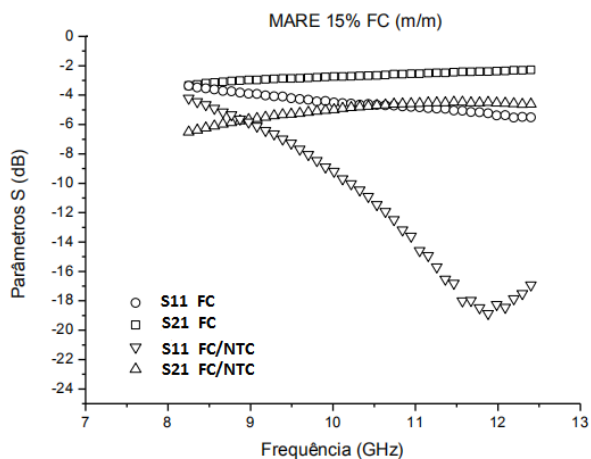


Fig. 3. Parâmetro de espalhamento de transmissão (S_{21}) e reflexão (S_{11}) para a estrutura de 1 camada FC (15% m/m) e de 2 camadas FC/NTC, com 1% NTC m/m.

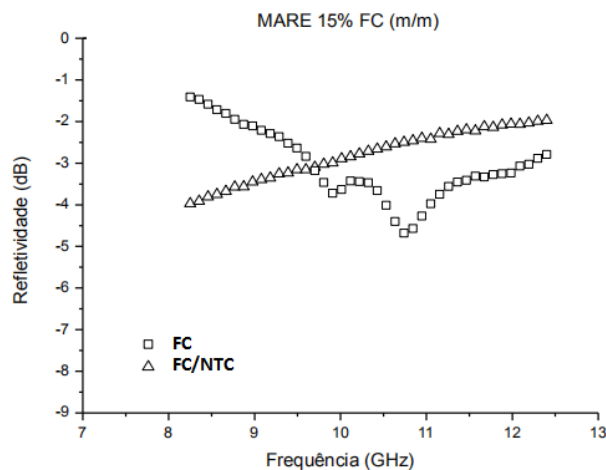


Fig. 6. Parâmetro de refletividade (RL) para a estrutura de 1 camada FC (15% m/m) e de 2 camadas FC/NTC, com 1% NTC m/m.

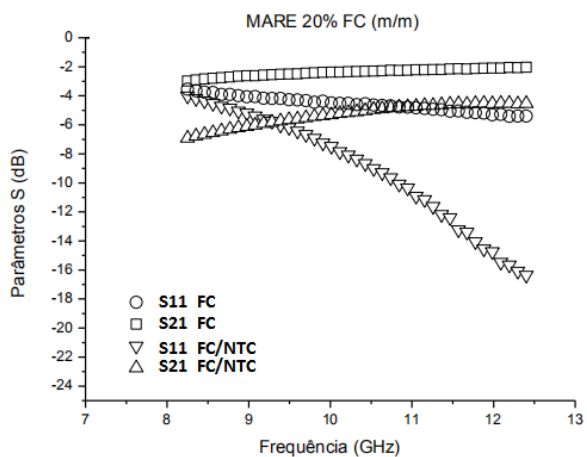


Fig. 4. Parâmetro de espalhamento de transmissão (S_{21}) e reflexão (S_{11}) para a estrutura de 1 camada FC (20% m/m) e de 2 camadas FC/NTC, com 1% NTC m/m.

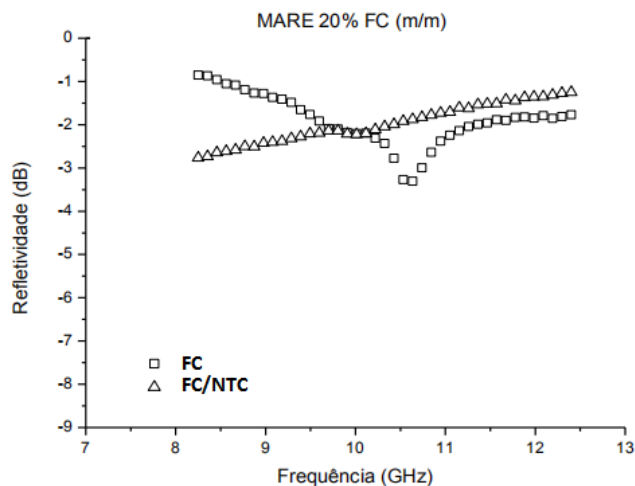


Fig. 7. Parâmetro de refletividade (RL) para a estrutura de 1 camada FC (20% m/m) e de 2 camadas FC/NTC, com 1% NTC m/m.

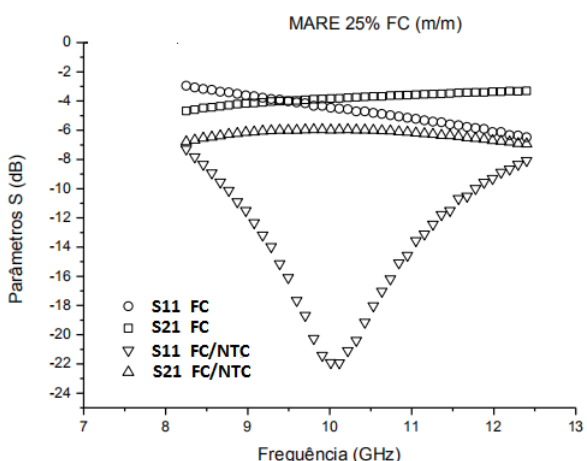


Fig. 5. Parâmetro de espalhamento de transmissão (S_{21}) e reflexão (S_{11}) para a estrutura de 1 camada FC (25% m/m) e de 2 camadas FC/NTC, com 1% NTC m/m.

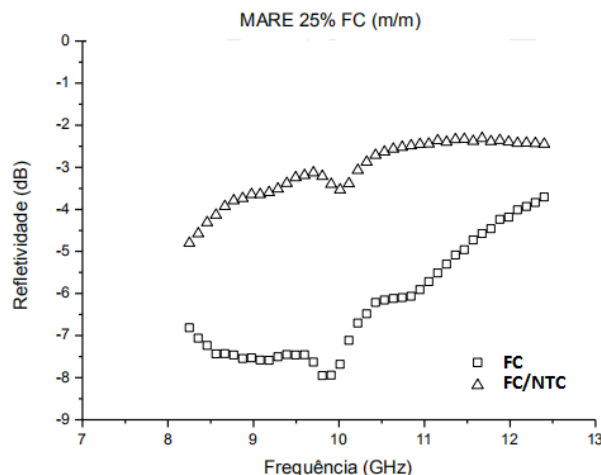


Fig. 8. Parâmetro de refletividade (RL) para a estrutura de 1 camada FC (25% m/m) e de 2 camadas FC/NTC, com 1% NTC m/m.

As medidas de refletividade com placa foram realizadas para todas as amostras de MARE, com concentração de 15%, 20% e 25% de FC de camada única e com dupla camada

com 1% de NTC, Fig. 6, 7 e 8. As curvas dos MARE com camada dupla apresentam um comportamento de banda larga, com uma atenuação de -4 dB, enquanto que o MARE de camada única de FC apresenta comportamento ressonante,

com um pico de ressonância em torno de -8 dB no compósito dupla camada com 25% de FC. Mesmo com o aumento de FC no MARE, os resultados no absorvedor de dupla camada não foram maiores que o absorvedor de camada única, o que não significa que não tem comportamento de material absorvedor. Todos os compósitos apresentam comportamento absorvedores.

Relacionando os resultados com os parâmetros de transmissão (S_{21}), a adição da camada de NTC no MARE, elevou a absorção, mostrando que um ajuste de concentração e uma maior dimensão da camada do dielétrico podem melhorar o comportamento do absorvedor na atenuação da onda eletromagnética [11]-[12].

Fazendo-se a correlação entre os parâmetros S (S_{11} e S_{21}) e as curvas de refletividade, Fig. 6, 7 e 8, nota-se que o processamento de MARE é muito complexo, pois deve-se levar em consideração não somente o aditivo utilizado, mas também a concentração e espessura do absorvedor, bem como a faixa de frequência estudada, pois o comprimento da onda incidente está diretamente relacionada ao tipo do aditivo [1].

IV. CONCLUSÕES

Os resultados apresentados mostram que os compósitos estudados apresentam bom comportamento como MARE. A adição da segunda camada dielétrica na camada de ferro-carbonila, contribuiu para que o absorvedor apresentasse um comportamento de banda larga. Os valores do parâmetro de transmissão, S_{21} , apresentou uma melhora, que indica que a onda eletromagnética teve uma melhor distribuição no absorvedor. O desempenho de um MARE é dependente da concentração e da espessura do absorvedor, neste caso, para melhorar a eficiência de absorção da onda eletromagnética pelos absorvedores, é necessário um ajuste da razão de massa FC/NTC e espessura da camada das amostras, pois os resultados apresentados, indicam perspectivas promissoras para um excelente desempenho como absorvedor de radiação eletromagnética na faixa de frequência estudada.

V. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio financeiro do CNPq. Este trabalho foi parcialmente financiado pelo CNPq, através do Projeto Universal, No. 408560/2016-9.

REFERÊNCIAS

- [1] SILVA, V. A. et al. "Nanostructured Composites Based on Carbon Nanotubes and Epoxy Resin for Use as Radar Absorbing Materials". *Materials Research*, v. 16, p. 1299 – 1308, 12 2013. ISSN 1516-1439.
- [2] FOLGUERAS, L. d. C.; ALVES, M. A.; REZENDE, M. C. "Microwave Absorbing Paints and Sheets Based on Carbonyl Iron and Polyaniline: Measurement and Simulation of Their Properties". *Journal of Aerospace Technology and Management*, sciELO, v. 2, p. 63 – 70, 04 2010. ISSN 2175-9146.
- [3] SAVI, P.; GIORCELLI, M.; QUARANTA, S. "Multi-Walled Carbon Nanotubes Composites for Microwave Absorbing Applications". *Applied Sciences*, v. 9, n. 5, 2019. ISSN 2076-3417.
- [4] SILVA, V. A. d.; REZENDE, M. C. "Effect of the Morphology and Structure on the Microwave Absorbing Properties of Multiwalled Carbon Nanotube Filled Epoxy Resin Nanocomposites". *Materials Research*, sciELO, v. 21, 00 2018. ISSN 1516-1439.
- [5] IDRIS, F. M. et al. "Recent Developments of Smart Electromagnetic Absorbers Based Polymer-composites at Gigahertz Frequencies". *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, v. 405, p. 197 – 208, 2016. ISSN 0304-8853.

- [6] BHATTACHARJEE, Y.; ARIEF, I.; BOSE, S. "Recent Trends in Multi-layered Architectures Towards Screening Electromagnetic Radiation: Challenges and Perspectives". *J. Mater. Chem. C*, The Royal Society of Chemistry, v. 5, p. 7390–7403, 2017.
- [7] KNOTT, E. F.; SCHEFFER, J. F.; TULEY, M. T. *Radar Cross Section: Its Prediction, Measurement, and Reduction*. 6. ed. Dedham: Artech House, 1985.
- [8] VERMA, P. et al. "Excellent Electromagnetic Interference Shielding and Mechanical Properties of High Loading Carbon-Nanotubes/Polymer Composites Designed Using Melt Recirculation Equipped Twin-screw Extruder". *Carbon*, v. 89, p. 308 – 317, 2015. ISSN 0008-6223.
- [9] AGILENT Basics of Measuring the Dielectric Properties of Materials. [S.l.], 2006.
- [10] MICHELLI, D. et al. "Synthesis and Electromagnetic Characterization of Frequency Selective Radar Absorbing Materials Using Carbon Nanopowders". *Carbon*, v. 77, p. 756 – 774, 2014. ISSN 0008-6223.
- [11] SU, J. et al. "Effect of Carbon Black on Dielectric and Microwave Absorption Properties of Carbon Black/Cordierite Plasma-Sprayed Coatings". *Journal of Thermal Spray Technology*, v. 24, n. 5, p. 826–835, Jun 2015. ISSN 1544-1016.
- [12] LIU, X. et al. "Fabrication and Electromagnetic Interference Shielding Effectiveness of Carbon Nanotube Reinforced Carbon Fiber/pyrolytic Carbon Composites". *Carbon*, v. 68, p. 501 – 510, 2014. ISSN 0008-6223.