

Compósitos Estruturais Absorvedores de Radiação Eletromagnética

Flávio A. S. Camargo¹, Eduardo Machado Martins¹, Nicolas Maestro Francisco¹, Vitor Fernando de Melo Gonçalves¹, Luiza de Castro Folgueras¹, Mirabel Cerqueira Rezende², Evandro Luís Nohara¹

¹Universidade de Taubaté, Departamento de Engenharia Mecânica, Rua Prof. Daniel Danelli, s/n, Taubaté/SP, CEP 12060-440

²Universidade Federal de São Paulo, Rua Talim, 330, São José dos Campos/SP, CEP 12231-280

Resumo — Compósitos estruturais absorvedores de radiação eletromagnética aliam capacidade de suportar esforços mecânicos e absorção de radiação eletromagnética, e são constituídos de uma matriz polimérica, reforços baseados em fibras contínuas ou descontínuas, e um centro absorvedor de radiação eletromagnética, com perdas dielétricas e/ou magnéticas. A presente proposta de trabalho tem como objetivo estudar a produção e a caracterização óptica e eletromagnética (banda X) de compósitos estruturais constituídos de fibra de vidro/epóxi, fibra de carbono/epóxi e filmes finos absorvedores de radiação eletromagnética em escala nanométrica (5, 10 e 15 nm), baseados no elemento químico cobre, depositados sobre o substrato polimérico poli(tereftalato etileno) na forma de filme, pelo processo *magnetron sputtering*. Os resultados obtidos mostram valores de atenuação da energia da onda eletromagnética entre -0,5 e -11 dB, obtidos com compósitos estruturais com diferentes arquiteturas, com variação da sequência e quantidade de camadas de tecidos de fibra de vidro/carbono e filmes finos.

Palavras-Chave — Compósitos estruturais, filmes finos absorvedores de radiação eletromagnética.

I INTRODUÇÃO

Absorção e blindagem contra interferências eletromagnéticas são assuntos de grande importância, tanto para o mercado civil quanto militar. O aumento da utilização de aparelhos eletrônicos de comunicação no campo civil e militar vem gerando uma preocupação crescente sobre a sua sensibilidade à interferência eletromagnética, por isso são realizados extensos estudos de compatibilidade. Em alguns casos, a resolução de problemas de compatibilidade eletromagnética requer a utilização de materiais absorvedores de radiação eletromagnética (MARE), estruturais ou não. No campo de estudo sobre redução da assinatura reta radar (*Radar Cross Section – RCS*) em plataformas terrestres, marítimas ou aéreas, os absorvedores de radiação eletromagnética estruturais, também conhecidos como *Radar Absorbing Structures (RAS)*, são empregados quando é necessário aliar propriedades mecânicas como resistência ao impacto, torção, tração, compressão e flexão, entre outros, com a absorção de radiação eletromagnética.

O RCS refere-se à quantidade de energia eletromagnética refletida por um material. Ao reduzir o RCS de plataformas aéreas, terrestres e marítimas, é possível infiltrar-se mais facilmente em territórios inimigos sem ser detectados.

Flávio A. S. Camargo, flavio.camargo.013@gmail.com, Eduardo Machado Martins, martins.designer@gmail.com, Nicolas Maestro Francisco, nmf_109@hotmail.com, Vitor Fernando de Melo Gonçalves, vitorfernando@hotmail.com, Luiza de Castro Folgueras, luiza.folgueras@unitau.com.br, Evandro Luís Nohara, evandro.nohara@unitau.com.br, tel (12) 3622-4005, Mirabel Cerqueira Rezende, mirabel@unifesp.br, tel (12) 3309-9620.

Os autores agradecem ao CNPq (Proc. 303287/2013-6 e 119653/2014-1) e à CAPES (Proc. 774399/2012 e 775987/2012) pelo apoio financeiro, e ao Laboratório de Guerra Eletrônica do ITA pelas medidas eletromagnéticas.

Existem métodos para se reduzir o RCS de plataformas militares, envolvendo geometrias estrategicamente concebidas em projeto, emprego de MARE e/ou RAS. Na redução por meio da forma geométrica, as ondas eletromagnéticas incidentes são dispersas em diversas direções, minimizando assim o seu retorno para o sistema radar. Por outro lado, MARE e RAS são materiais especialmente desenvolvidos para absorver as ondas eletromagnéticas e conseqüentemente minimizar a quantidade de ondas refletidas.

Uma vez que as propriedades mecânicas dos materiais compósitos são consequência de sua configuração (tipos de fibras e matrizes) e seqüência de empilhamento do reforço, tais compósitos podem ser utilizados para a fabricação de estruturas absorvedoras de radiação eletromagnética com diferentes finalidades [1]. Pensando nisso, nas últimas décadas, os princípios fundamentais de projeto para a construção de materiais absorvedores ou estruturas absorvedoras, como a tela de Salisbury, absorvedor de Jaumann, como outros, vem sendo desenvolvidos e reportados em literaturas [2].

As estruturas absorvedoras de radiação eletromagnética podem ser compostas de aditivos em escala nanométrica, que exibem maior capacidade de absorção da energia da onda eletromagnética por perda ôhmica. Além disso, podem exibir comportamento de cancelamento das ondas eletromagnéticas por interferência destrutiva [3].

II. RESSONÂNCIA EM FILMES FINOS ABSORVEDORES DE RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA

As propriedades elétricas e, mais especificamente, resistentes de filmes finos, sugerem a explicação dos mecanismos de atenuação por meio da transformação da energia incidente em calor por efeito Joule. Tal fenômeno é decorrente devido a indução de correntes superficiais como Resistividade ($\mu\Omega \cdot cm$) e Espessura (nm), uma vez que estas são geradas devido à taxa de variação do fluxo magnético incidente através de um material condutor (Equações de Maxwell). As correntes de Eddy atenuam os campos elétrico e magnético e ocasionam perdas ôhmicas que acarretam a dissipação de energia onde são induzidas. A profundidade na qual estas correntes penetram na superfície de um condutor é denominada camada pelicular (δ), ou *skin depth*. Tal propriedade pode ser avaliada conforme apresentado na Equação 1, sendo definida em função da frequência (f), condutividade (σ) e permeabilidade do material (μ) [4].

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (1)$$

O processo de atenuação de radiação ocorre quando o recobrimento apresenta espessuras inferiores à camada peli-

cular, uma vez que a onda eletromagnética incidente consegue penetrar no material de modo a promover a formação de correntes de Eddy [5]. Materiais metálicos, em geral, refletem a radiação eletromagnética incidente, mas reduções de espessura possibilitam a penetração da onda no material a dadas frequências e a indução de correntes superficiais [4].

O gráfico da Fig. 1 relaciona a curva de atenuação de microondas em função da frequência, de um filme constituído de uma liga tipo kanthal (alumínio: 5,8 %, cromo: 22% e ferro: 72,2%, em massa), com espessura igual a 100 nm, depositado por evaporação tipo *flash* em substrato de alumínio e vidro [6]. Pode-se observar pelo gráfico que o filme apresenta um comportamento de atenuação tipo faixa larga (*broadband*), com máximo de atenuação em ~16,2 GHz. Para um filme com 100 nm de espessura, uma atenuação de 0,8 dB (17%) é considerada significativa. O fenômeno da camada pelicular também é observado em outras regiões do espectro eletromagnético, como o infravermelho [7]-[8], visível [9]-[10], bem como em sistemas constituídos de plasma [6].

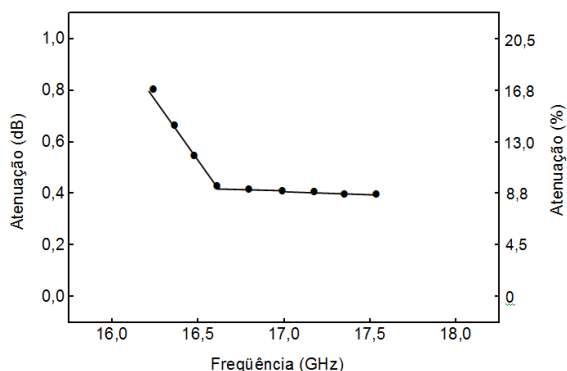


Fig. 1 Curva de atenuação de microondas do filme de kanthal (16,3 -17,0 GHz), com espessura igual a 100 nm [6].

III. MATERIAIS E MÉTODOS

Foram obtidos filmes finos através da deposição de cobre em um substrato de PET (poli(tereftalato de etileno)), nas espessuras de 10, 15 e 20 nm, pela técnica *Magnetron Sputtering*, a partir de um alvo de cobre com 99,999% de pureza e diâmetro de 152,4 mm. Primeiramente o sistema foi evacuado para uma pressão base de 0,05 mTorr, em seguida foi inserido gás argônio até uma pressão de trabalho de 50 mTorr. A distância do alvo para o substrato foi de 300 mm. Foi empregado uma corrente de 1,4 A e uma tensão de 166 V e taxa de deposição de 0,8 nm/s. Para que todos os filmes fossem depositados sobre a mesma condição foi utilizado um porta-amostra com um sistema contínuo, permitindo a deposição de diversos filmes, sem a necessidade de abrir a câmara para a troca de amostras. A espessura dos filmes foi monitorada em tempo real por meio de um cristal de quartzo ressonador, onde o material evaporado é depositado simultaneamente no substrato e no cristal.

Os compósitos estruturais absorvedores de radiação eletromagnética foram obtidos pela laminação de camadas de tecidos pré-impregnados (*prepreg*) de fibra de vidro/epóxi, fibra de carbono/epóxi e filmes finos absorvedores de radiação eletromagnética, organizados em três diferentes configurações para cada espessura de cobre depositado sobre um

substrato polimérico constituído de poli(tereftalato etileno), com espessura de 15µm, representados na Fig. 2.

Os lotes possuem configurações diferentes de laminação, a Fig.2(a) possui a configuração de uma camada de tecido de fibra de carbono na parte inferior, cinco camadas de tecido de fibra de vidro, uma camada de filme fino absorvedor, e cinco camadas de fibra de vidro na parte superior. Assim, essa configuração pode ser representada por 1FC [5FV,1FF]₁ 5FV, onde FC é fibra de carbono, FF é filme fino absorvedor e FV fibra de vidro. A Fig.2(b) possui uma camada de tecido de fibra de carbono, três camadas de tecido de fibra de vidro e uma camada de filme fino, tal configuração é repetida duas vezes, e são adicionadas mais três camadas de tecido de fibra de vidro. Assim, essa configuração pode ser representada por 1FC [3FV,1FF]₂ 3FV. A Fig.2(c) possui a configuração de uma camada de tecido de fibra de carbono, duas camadas de tecido de fibra de vidro e uma camada de filme fino absorvedor, configuração repetida por quatro vezes, e por final contém mais duas camadas de tecido de fibra de vidro, representada por 1FC [2FV,1FF]₄ 2FV.

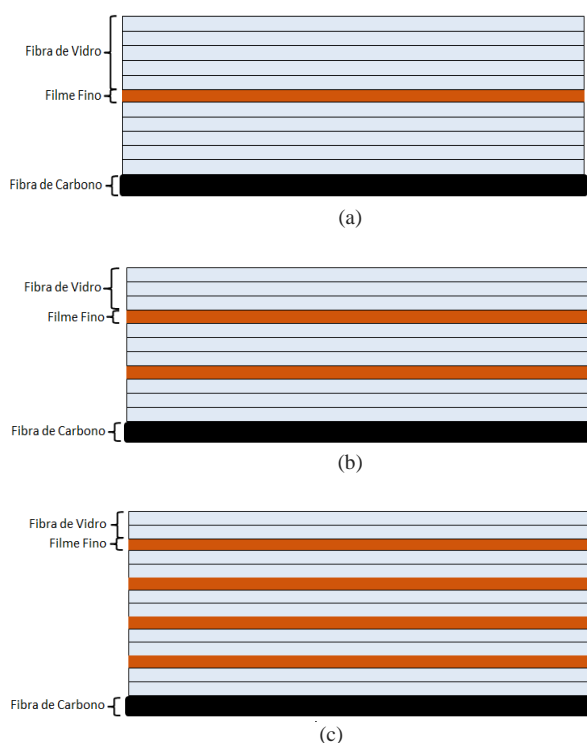


Fig. 2. Configurações do compósito estrutural absorvedor de radiação eletromagnética. (a) utilização de uma camada de filme fino absorvedor (Lote I). (b) utilização de duas camadas de filme fino absorvedor (Lote II). (c) utilização de quatro camadas de filme fino absorvedor (Lote III).

Os compósitos foram consolidados via saco de vácuo e autoclave, segundo padrões aeronáuticos, para obter uma porcentagem de volume de vazios na matriz polimérica inferior a 2%. A microscopia óptica foi realizada no Laboratório de Materiais e Ensaio do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté, em um microscópio este-reoscópio da marca Zeiss, modelo Stemi 2000-C, com câmara digital de 5 megapixels conectadas a um computador com placa de aquisição de imagens e software de análise de imagens. A caracterização eletromagnética foi realizada em guia de onda, na banda X do espectro eletromagnético (8,2-12,4 GHz). As caracterizações eletromagnéticas dos filmes foram

realizadas no Laboratório de Guerra Eletrônica do Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), pela utilização de um Network Analyzer Agilent N5230C, na faixa de frequências de 8,2 a 12,4 GHz.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As Fig.3(a), 3(b) e 3(c) mostram a micrografia óptica dos compósitos contendo filmes finos com a espessura de cobre de 10nm. Pode ser observado que os compósitos não contêm porosidade aparente, e o filme fino está bem consolidado no interior do compósito.

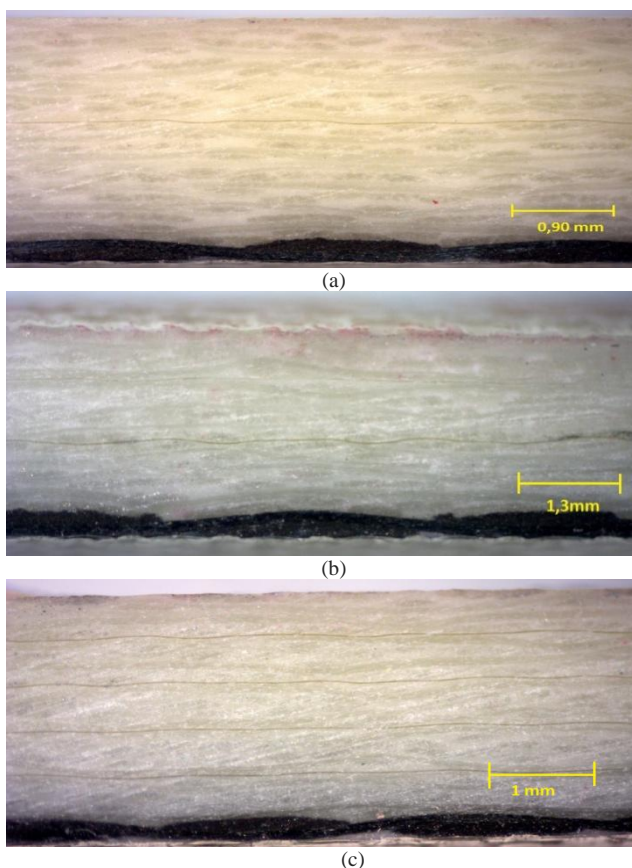


Fig. 3. Compósitos estruturais absorvedores de radiação eletromagnética com filmes finos de 10nm (FF^{10nm}). (a) Lote 10 nm-I: 1FC [5FV, 1FF^{10nm}]₁ 5FV. (b) Lote 10nm-II: 1FC [3FV, 1FF^{10nm}]₂ 3FV. (c) Lote 10nm-III: 1FC [2FV, 1FF^{10nm}]₄ 2FV.

A Fig. 4 mostra as espessuras das camadas das arquiteturas das configurações da Fig. 2, medidas pelo software de análise de imagens acoplado ao microscópio óptico. A partir dos dados apresentados na Fig. 4, cada camada de tecido de fibra de vidro apresenta, em média, uma espessura de 220 μm (0,22 mm), típica de compósitos processados a partir de tecidos prepreg e consolidados via saco de vácuo e autoclave, segundo padrões aeronáuticos. Cada camada de substrato polimérico composto de PET e com a camada de cobre (10, 15 e 20 nm), possui 15,32 μm de espessura. O tecido de fibra de carbono apresenta uma espessura de 240 μm.

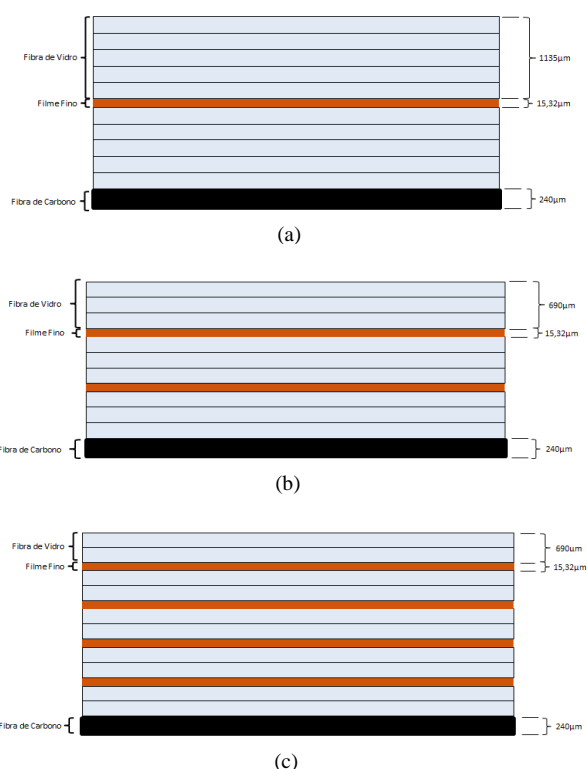


Fig. 4. Medidas das espessuras das configurações do compósito estrutural absorvedor de radiação eletromagnética. (a) utilização de uma camada de filme fino absorvedor (Lote I). (b) utilização de duas camadas de filme fino absorvedor (Lote II). (c) utilização de quatro camadas de filme fino absorvedor (Lote III).

A Fig.5 mostra o gráfico da caracterização eletromagnética dos lotes da família de compósitos de 10nm, apresentados na Fig. 3. É possível observar que a configuração do Lote 10nm II (1FC [3FV, 1FF^{10nm}]₂ 3FV) possui a melhor eficiência de atenuação na faixa de frequência de 9GHz a 10GHz, com pico de atenuação de -2,6dB, ou seja, 45% de atenuação. O perfil da curva do Lote 10 nm II (em vermelho), mostra um caráter ressonante, típico de material que exibe cancelamento das ondas eletromagnéticas por interferência destrutiva [3]. Uma explicação provável para esse comportamento é que quando a onda eletromagnética penetra no material, parte é refletida na primeira camada (denominada E_{r1}), e a porção da onda eletromagnética que penetra no interior do material, é refletida pelas camadas internas do material (denominada E_{ri}). Assim, as ondas eletromagnéticas que emergem na superfície do material oriundas de E_{ri} sofrem cancelamento por interferência destrutiva, com a onda eletromagnética E_{r1}. A curva em verde (Lote 10 nm III) mostra um comportamento banda larga, com a formação de uma provável ressonância a partir de 10 GHz, com máximo em frequências superiores a 12,4 GHz. A curva em preto (Lote 10 nm I) mostra um comportamento banda larga.

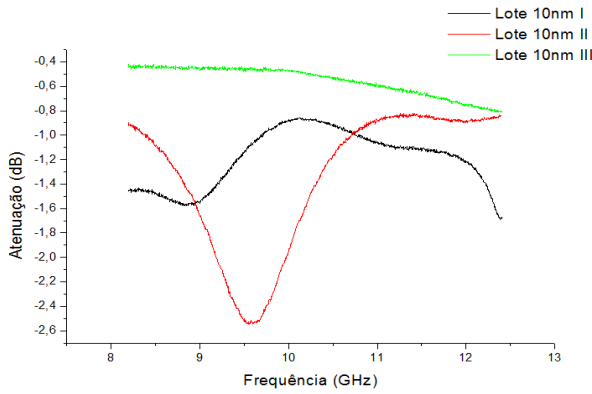


Fig. 5. Gráfico de atenuação eletromagnética do Lote 10nm-I: 1FC [5FV,1FF^{10nm}]₁ 5FV, Lote 10nm-II: 1FC [3FV,1FF^{10nm}]₂ 3FV e Lote 10nm-III: 1FC [2FV,1FF^{10nm}]₄ 2FV.

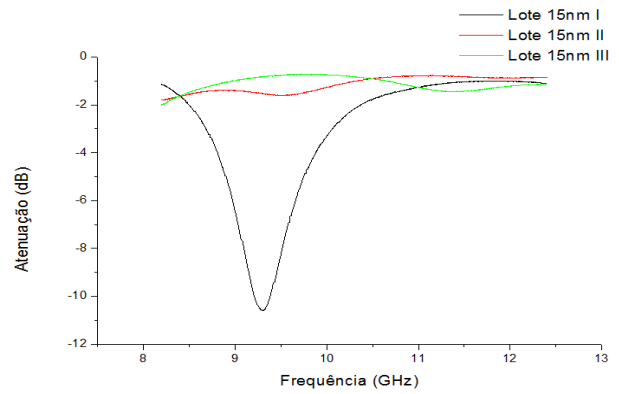


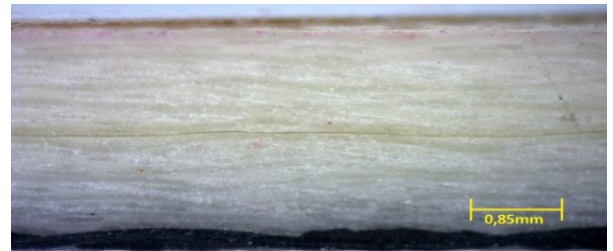
Fig. 7. Gráfico de atenuação eletromagnética do Lote 15 nm-I: 1FC [5FV,1FF^{15nm}]₁ 5FV, Lote 15nm-II: 1FC [3FV,1FF^{15nm}]₂ 3FV e Lote 15nm-III: 1FC [2FV,1FF^{15nm}]₄ 2FV.

As Fig.6(a), 6(b) e 6(c) mostram a micrografia óptica dos lotes da família 15nm. Pode ser observado na Fig. 6, como na Fig. 3, que os compósitos não contêm porosidade aparente, e o filme fino está bem consolidado no interior do compósito. O gráfico de atenuação da energia da onda eletromagnética dos compósitos estruturais com filmes de 15nm é mostrado na Fig.7. Pode-se observar que o Lote 15nm I possui uma alta atenuação de energia da onda eletromagnética, compreendida entre 9 GHz a 9,5 GHz, com o valor de atenuação de -11dB, o que equivale a uma atenuação de 92%, com um caráter ressonante. Os Lotes 15nm II e 15nm III possuem atenuações de no máximo -2 dB.

As Fig. 8(a), 8(b) e 8(c) mostram a micrografia óptica dos lotes da família 20nm, também com boa consolidação do filme fino no interior do compósito. O gráfico de atenuação de energia da onda eletromagnética dos compósitos estruturais com filmes de 20nm é mostrado na Fig. 9. O Lote 20nm I apresentou melhores resultados de atenuação de energia da onda eletromagnética na faixa de 8GHz a 9GHz, de até -3,5 dB, ou seja, uma atenuação de 57%, com caráter ressonante. Os Lotes 20 nm I e 20 nm II apresentam um valor máximo de atenuação de -0,7 e -1,5 dB, respectivamente.



(a)



(a)



(b)



(b)



(c)



(c)

Fig. 6. Compósitos estruturais absorvedores de radiação eletromagnética com filmes finos de 15nm (FF^{15nm}). (a) Lote 15 nm-I: 1FC [5FV,1FF^{15nm}]₁ 5FV. (b) Lote 15nm-II: 1FC [3FV,1FF^{15nm}]₂ 3FV. (c) Lote 15nm-III: 1FC [2FV,1FF^{15nm}]₄ 2FV.

Fig. 8. Compósitos estruturais absorvedores de radiação eletromagnética com filmes finos de 20nm (FF^{20nm}). (a) Lote 20 nm-I: 1FC [5FV,1FF^{20nm}]₁ 5FV. (b) Lote 20nm-II: 1FC [3FV,1FF^{20nm}]₂ 3FV. (c) Lote 20nm-III: 1FC [2FV,1FF^{20nm}]₄ 2FV.

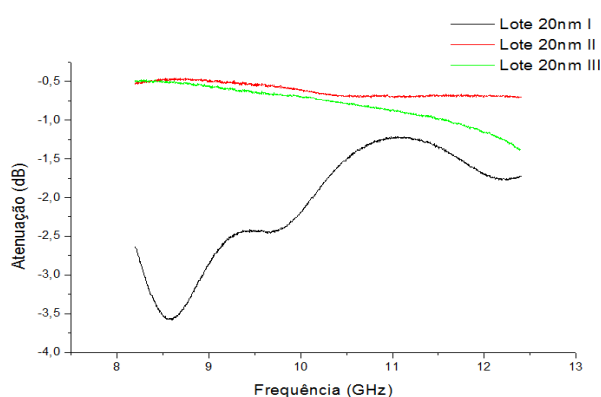


Fig. 9. Gráfico de atenuação eletromagnética do lote 20 nm-I: 1FC [5FV, 1FF^{20nm}]₁ 5FV, lote 20nm-II: 1FC [3FV, 1FF^{20nm}]₂ 3FV e lote 20nm-III: 1FC [2FV, 1FF^{20nm}]₄ 2FV.

Todos os compósitos obtidos apresentam algum nível de atenuação da energia da onda eletromagnética, sendo que os maiores valores de atenuação mostram um caráter ressonante, típico de material que exhibe cancelamento das ondas eletromagnéticas por interferência destrutiva. Análises adicionais são necessárias para maior entendimento da interação onda-matéria dos compósitos obtidos, envolvendo obtenção e caracterização de compósitos estruturais nas configurações descritas na Fig. 2, sem a deposição de cobre no substrato polimérico de PET. Além dessas caracterizações, obtenção dos compósitos estruturais nas configurações descritas na Fig. 2, sem a camada de tecido de fibras de carbono, que possui comportamento refletor, para viabilizar a medição dos parâmetros S_{11} e S_{21} . As medições sugeridas permitirão maior entendimento dos comportamentos de atenuações observados nos compósitos obtidos, pois trabalhos anteriores comprovaram a capacidade de absorção da energia da onda eletromagnética por filmes finos metálicos, com espessuras da ordem nanométrica [5, 11, 12].

V. CONCLUSÕES

Os compósitos estruturais absorvedores de radiação eletromagnética constituídos de filmes finos baseados em cobre com as espessuras 10, 15 e 20nm, o, com diferentes configurações de laminação, apresentaram resultados de atenuação de energia da onda eletromagnética de -0,5 dB até -11 dB. O Lote 15nm I apresentou o melhor resultado de atenuação da onda eletromagnética, com um percentual de atenuação de 92% na faixa de 9,0 GHz a 9,5 GHz, com caráter ressonante. Em todos os compósitos processados, não há porosidade aparente, e os filmes finos estão bem consolidados no interior do compósito.

REFERÊNCIAS

- [1] I. S. Seo, W.S. Chin, D. G. Lee, "Characterization of electromagnetic properties of polymeric composite materials with free space method", Twelfth International Conference on Composite Structures, Volume 66, Issues 1-4, Pages 533-542, December 2014.
- [2] W. S. Chin, D. G. Lee, "Development of the composite RAS (radar absorbing structure) for the X-band frequency range", Composite Structures, Volume 77, Issue 4, February 2007, Pages 457-465.
- [3] I. Choi, D. Lee; D. G. Lee, "Optimum design method of a nanocomposite radar absorbing structure considering dielectric properties in the X-band frequency range", Composite Structures, Volume 119, January 2015, Pages 218-226.

- [4] H. B. Quadros, "Avaliação das características resistivas de filmes finos absorvedores de radiação eletromagnética", Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal de Santa Catarina. Santa Catarina, 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/127472/QUADROS_TCC.pdf?sequence=1>. Acessado em 20/05/2015.
- [5] V. L. Soethe, E. L. Nohara, L. C. Fontana, M. C. Rezende, "Influência da espessura de filmes finos de alumínio na atenuação da energia da onda eletromagnética na faixa de microondas (8 - 12GHz)", Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo, v. 27, n. 2, 63-67, 2008.
- [6] K. S. Bhat, S. K. Datta, C. Suresh, "Electrical and microwave characterization of kanthal thin films: temperature and size effect", Thin Solid Films, vol. 332, p. 220-224, 1998.
- [7] P. K. Nair, J. Cardoso, G. Daza, M. T. S. Nair, "Polyethersulfone foils as stable transparent substrates for conductive copper sulfide thin film coatings", Thin Solid Films, vol. 401, 243-250, 2001.
- [8] L. A. Kuzik, V. A. Yakovlev, "Effect of a noble metal coating on a natural aluminum oxide film", Solid Films, vol. 340, p. 288-291, 1999.
- [9] N. Inagaki, Plasma Surface Modification and Plasma Polymerization. Technomic Publishing Company Book, 1996.
- [10] Y. Pauleau, P. B. Barna, Protective Coatings and Thin Films - Synthesis, Characterization and Applications. NATO ASI Series, High Technology - Vol. 21, 1996.
- [11] D. S. Costa. "Obtenção e caracterização de filmes ultrafinos de cobre absorvedores de micro-ondas na faixa de 8 a 12 GHz". Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de São Paulo, 2014.
- [12] V. L. Soethe. "Filmes finos absorvedores de microondas obtidos pelo processo de deposição física em fase vapor". Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2009.