

Estudo de Materiais Multicamadas para Controle de Interferência Eletromagnética

Glauber Rogério Lanziloti Alves^{1,2}, Lucas Barbosa Nascimento^{1,2}, Braulio Haruo Kondo Lopes², Guilherme Nader Kawassaki², Divani Carvalho Barbosa¹, Maurício Ribeiro Baldan²

¹Centro Paula Souza, Faculdade de Tecnologia de Taubaté, Taubaté/SP – Brasil

²Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, (INPE), São José dos Campos/SP – Brasil

Resumo – Esta pesquisa visa aprimorar a obtenção de Materiais Multicamadas (MCM, do inglês Multicomponent Materials) em laboratórios, especialmente para aplicações em tecnologias stealth que requerem transparência eletromagnética na banda X. Será utilizado um material composto por silicone puro, ferrocarbonila e ferrita manganês-zinco como exemplo de MCM. A análise será conduzida por meio de microscopia eletrônica de varredura e medidas no Analisador de Rede Vetorial (VNA), que fornecerão as imagens de superfície e os parâmetros constitutivos, permissividade elétrica e permeabilidade magnética de cada camada em função da frequência. Um software desenvolvido especificamente para este propósito simulará de maneira dinâmica diferentes espessuras e posicionamentos das camadas, permitindo o cálculo da perda por reflexão e a representação gráfica dos resultados. Esta ferramenta propõe-se a realizar uma análise aprofundada e otimização da obtenção de MCM em laboratórios, preparando-os para aplicações avançadas em tecnologias furtiva, onde a redução da reflexão e o aumento da transparência são cruciais.

Palavras-Chave – MCM, VNA, Furtiva.

I. INTRODUÇÃO

A crescente demanda por tecnologias furtivas nas áreas militar e aeronáutica tem impulsionado a pesquisa e o desenvolvimento de materiais com propriedades eletromagnéticas específicas que permitam a redução da detectabilidade de veículos e dispositivos. Entre essas tecnologias, destaca-se a necessidade de transparência eletromagnética na banda X, crucial para aplicações furtivas [1, 2]. A obtenção de MCM (MCM, do inglês Multicomponent Materials) que atendam a esses requisitos é um desafio significativo, dada a complexidade envolvida na combinação de diferentes materiais com propriedades eletromagnéticas complementares.

Neste contexto, a presente pesquisa visa aprimorar a obtenção e otimização de MCM em ambientes laboratoriais, com foco em aplicações que exigem alta transparência eletromagnética na banda X. Utilizando uma metodologia que integra medições experimentais e simulações computacionais, a pesquisa busca desenvolver um material composto por silicone puro, ferrocarbonila e ferrita manganês-zinco, exemplificando um MCM promissor para essas aplicações.

A análise detalhada deste material foi conduzida por meio de técnicas de caracterização, incluindo microscopia eletrônica de varredura e medidas no analisador de rede vetorial. Essas técnicas forneceram informações cruciais sobre a superfície do material e seus parâmetros de

refletividade (dB), permissividade elétrica e permeabilidade magnética em função da frequência.

Este trabalho foi financiado pelo PIBIC/CNPq, através do Projeto Simulação de Materiais em Multicamadas para Controle de Interferência Eletromagnética. No. 158179/2023-4

Além disso, um *software* desenvolvido especificamente para esta pesquisa permitiu a simulação dinâmica de diferentes espessuras e posicionamentos das camadas, facilitando o cálculo da perda por reflexão e a representação gráfica dos resultados.

Ao combinar a baixa constante dielétrica do silicone com as propriedades magnéticas da ferrocarbonila e as altas perdas magnéticas da ferrita manganês-zinco, espera-se obter uma redução substancial na reflexão eletromagnética. Esta pesquisa pretende contribuir para a compreensão das interações entre esses materiais e fornecer uma base para futuras investigações e desenvolvimentos em tecnologia furtiva, destacando a importância da engenharia de materiais e da simulação computacional na otimização das propriedades eletromagnéticas de MCM.

II. MATERIAIS E MÉTODOS

Para alcançar uma absorção eficiente de radiação eletromagnética utilizando um conjunto de três camadas de materiais, é essencial projetar cada camada com propriedades específicas. A primeira camada, geralmente é composta por um material que atenua a onda eletromagnética incidente por meio de perdas magnéticas, convertendo a energia da onda em calor, como ferritas [3]. Nesse caso, usa-se ferrita manganês-zinco como a primeira camada devido às suas propriedades magnéticas [4]. A segunda camada, um material dielétrico com alta constante dielétrica, funciona como intermediário, promovendo reflexão interna e interferência construtiva para aumentar a absorção, além de ajustar a correspondência de impedância para minimizar a reflexão [4]. Para essa função, usa-se silicone puro como material dielétrico. Para terceira camada optou-se por um material condutor ou com alta permissividade, que atue como refletor, garantindo que as ondas possam ser canceladas por diferença de fase, através do ajuste da espessura. [5]. Aqui, foi proposto a ferrocarbonila como a terceira camada devido à sua alta permissividade [5]. A combinação precisa dessas três camadas, com propriedades, posicionamento e espessuras otimizadas, pode resultar em uma absorção eletromagnética eficiente, minimizando a reflexão.

A. Obtenção das Amostras

O MCM utilizado nesse trabalho foi preparado baseado na junção de particulados magnéticos dispersos em uma matriz de borracha de silicone. A primeira amostra foi a ferrita de manganês e zinco com fórmula $Mn_{0,56}Zn_{0,44}Fe_2O_4$, com massa específica de $5,029 \text{ g/cm}^3$. A segunda ferrocarbonila, com massa específica de $7,65 \text{ g/cm}^3$, e a terceira foi a borracha de silicone branca PS com massa específica de $1,26 \text{ g/cm}^3$.

As etapas de produção dessas amostras seguem o esquema representado na Fig.1, a dispersão do particulado magnético foi realizado sob agitação de forma manual até uma visível homogeneização da coloração, que durou entre 2 e 4 minutos. Posteriormente, foi colocado o agente de cura na proporção de 5% em relação a massa do silicone e por fim o sistema polimérico foi depositado no interior do molde. Para maiores detalhes a cerca da obtenção dessas amostras em laboratório vide a referência [3].

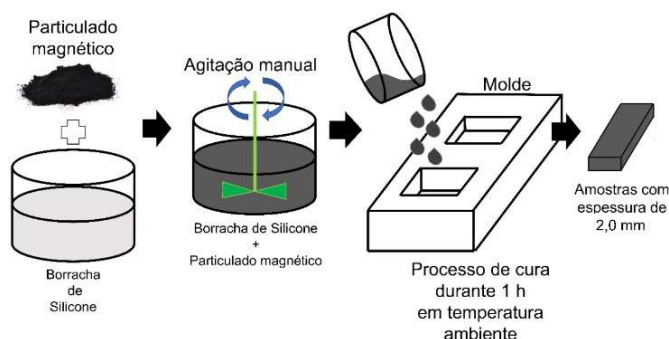


Fig. 1. Etapas do processamento do material composto [3].

A caracterização morfológica das amostras de ferrita MnZn e ferrocarbonila foi realizada por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), conforme Fig. 2. É possível observar que os particulados de ferrita MnZn apresentam formato de placas e os de ferrocarbonila apresentam formato de esferas. Com essa imagem conclui-se que a distribuição dos particulados na matriz polimérica varia com a geometria e volume, sendo mais difícil com ferrita MnZn devido à maior viscosidade e sua geometria de placas. Isso indica uma necessidade de maior controle em seu processamento em termos do acabamento da superfície do composto.

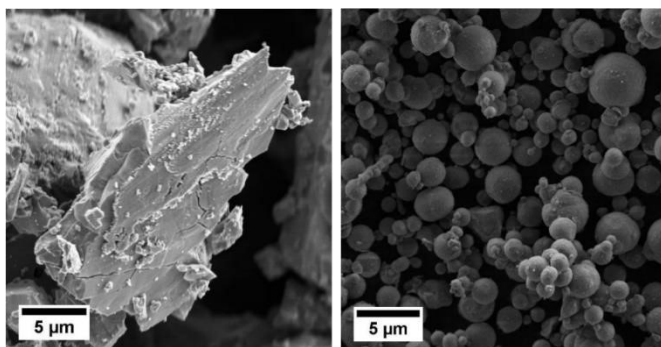


Fig. 2. Imagem MEV da amostra de ferrita manganês-zinco e ferrocarbonila, respectivamente.

B. Cálculo da Perda por Reflexão

A caracterização eletromagnética foi realizada utilizando o equipamento Analisador de Rede Vetorial (VNA, do inglês *Vector Network Analyzer*) modelo N5232A PNA-L da empresa Keysight Technologies apresentado na Fig. 3. O VNA é fundamental para a caracterização e testes de materiais que compõem sistemas de comunicação, radares, dispositivos de contramedidas eletrônicas e na tecnologia furtiva, pois, fornece dados fundamentais para o desenvolvimento de materiais que podem absorver eficientemente as ondas eletromagnéticas, minimizando a reflexão e, consequentemente, a detectabilidade por radares [1,2]. A capacidade de realizar medições detalhadas e precisas com o VNA facilita a otimização das espessuras e das combinações de materiais, contribuindo para o design de estruturas com propriedades furtivas superiores.

Na Fig. 3 apresentam quatro fotos. A Fig.3(a) mostra o VNA acoplado aos cabos transmissores e ao guia de onda retangular, a Fig. 3(b) exibe o local onde fica o offset (porta amostra). Fig. 3(c) detalha a configuração utilizada no software de simulação como mostrado na imagem ilustrativa apresentada na Fig. 4. Por fim, a Fig. 3(d) é destaca o offset e a placa metálica.

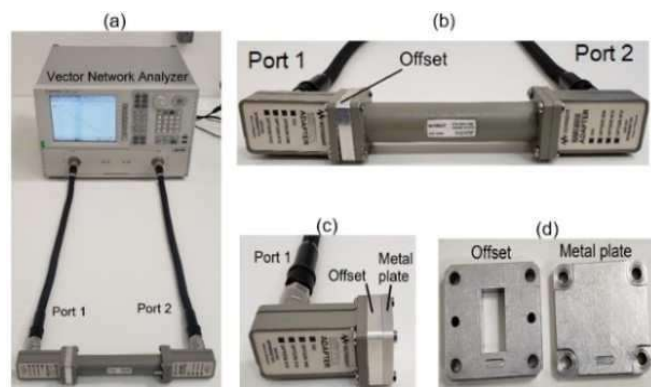


Fig. 3. (a) Equipamento VNA, (b) sistema de montagem do guia de onda, (c) vista frontal e (d) individual do offset e da placa metálica, respectivamente.

A forma como a análise dos MCM no VNA é feita é mostrada na representação esquemática da Fig. 4. As amostras de ferrocarbonila, ferrita MnZn e silicone puro foram dispostas em camadas, as quais compõem o MCM. A placa metálica posicionada atrás das três amostras tem um papel essencial, pois, é responsável por refletir toda a onda incidente. O equipamento nessa configuração quantifica, através do parâmetro S_{11} , quanto dessa onda foi atenuada pela amostra que se encontra posicionada a sua frente. Essa quantificação está relacionada com as propriedades eletromagnéticas da amostra, permissividade elétrica e permeabilidade magnética e sua espessura.

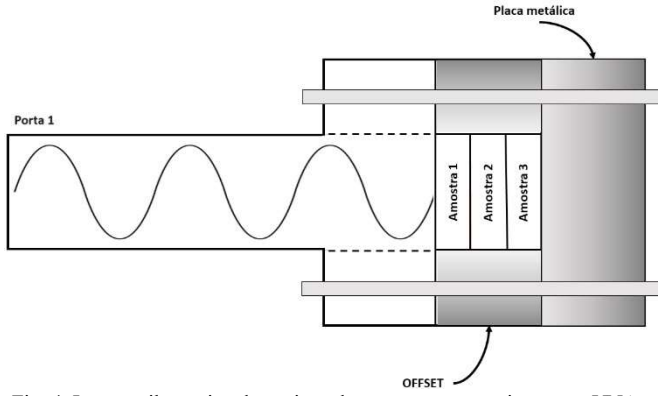


Fig. 4. Imagem ilustrativa da posição das amostras no equipamento VNA.

Os valores da permissividade elétrica e permeabilidade magnética do material em função da frequência foram obtidos através do VNA. Esses parâmetros obtidos experimentalmente são os parâmetros de entrada no *software* de simulação a serem utilizados no cálculo da perda por reflexão.

O cálculo da perda por reflexão em decibéis (dB), denominada aqui de *RL* (do inglês *Reflection Loss*), dado pela equação (1), é baseado no trabalho de Toktas et. al [4]. Nessa equação a impedância do meio material, Z_{in} é calculado pela equação (2) e Z_{00} seria a impedância intrínseca do cabo usado na medição, nesse trabalho consideramos $Z_{00} = 50$ Ohms.

$$RL = \frac{(Z_{in})_1 - Z_{00}}{(Z_{in})_1 + Z_{00}} \quad (1)$$

Onde:

$$(Z_{in})_i = Z_{0i} \frac{(Z_{in})_{i+1} + Z_{0i} \tanh(j2\pi f c^{-1} d_i \sqrt{\mu_i \epsilon_i})}{Z_{0i} + (Z_{in})_{i+1} \tanh(j2\pi f c^{-1} d_i \sqrt{\mu_i \epsilon_i})} \quad (2)$$

Na equação (2) as camadas do MCM aqui analisado são seguidas pelo índice $i = 1, 2$ e 3 , cada um representando uma diferente amostra, como mostrado na Fig. 5.

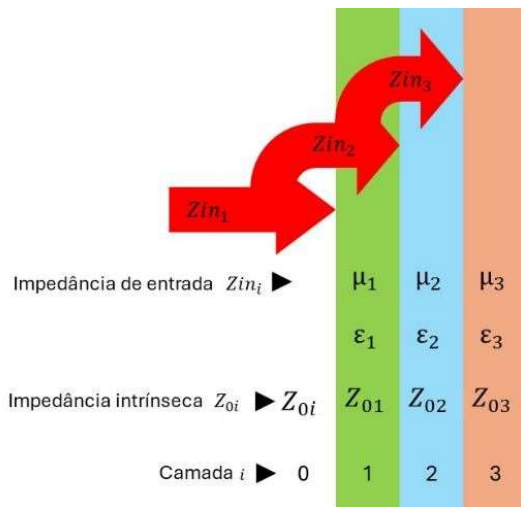


Fig. 5. Imagem ilustrativa da posição das amostras analisadas durante o cálculo a perda por reflexão usando o modelo MCM proposto por Toktas et. al [4].

O termo c da Equação 2 é a velocidade da luz, o d_i é a espessura da amostra i , f é a frequência da onda emitida, o μ_i

seria a permeabilidade magnética da amostra i que é composta por parte real e imaginária, sendo $\mu_i = \mu' - j\mu''$, e ϵ_i seria a permissividade elétrica da amostra i que é composta por parte real e imaginária, sendo $\epsilon_i = \epsilon' - j\epsilon''$. Ambos os valores reais e imaginários são obtidos pelo VNA. O valor de Z_{0i} é dado por:

$$Z_{0i} = \sqrt{\mu_i / \epsilon_i} \quad (3)$$

C. Simulação Computacional

Para resolução das equações da impedância e perda por reflexão foi desenvolvido um *software* que se utiliza o arquivo de saída fornecido pelo VNA como *input*. Esse arquivo contém em seu cabeçalho informações da amostra sob teste, bem como uma tabela com 1601 linhas e 5 colunas com os valores da frequência (f), componente real e imaginária da permissividade elétrica (ϵ' e ϵ'') e componente real e imaginária da permeabilidade magnética (μ' e μ'').

Logo após o *input* com os parâmetros eletromagnéticos das três amostras, as equações são calculadas pelo *software* através de um código em linguagem de programação Python. A opção por essa linguagem de programação para o cálculo se deu, pois, como a equação a ser resolvida é complexa, contém cálculos que utilizam de tangente hiperbólica e números complexos. Nesse sentido, a biblioteca numpy do Python mostrou-se ideal para esse fim. Ademais, o Python possui a biblioteca matplotlib que permite plotagem de gráficos tanto em modo estático como dinâmico. O endereço GitHub do *software* desenvolvido nesse trabalho é <https://github.com/GlauberLanzilotti/MultiCamadas/> [6].

III. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O *software* foi elaborado com uma interface simples, Fig. 6. A tela principal de acesso apresenta um gráfico da perda por reflexão (RL) calculada versus a frequência da onda, com os botões e barras deslizantes iterativas fornecendo diversas funcionalidades, sendo eles: Simulação da espessura de cada uma das três camadas, botão salvar dados, reiniciar simulação e gráfico com menos pontos. Essa ferramenta oferece uma interface intuitiva para a análise e otimização das propriedades das camadas, facilitando o estudo detalhado da absorção eletromagnética, bem como, possibilita a salvar dos resultados visualizados em tempo real.

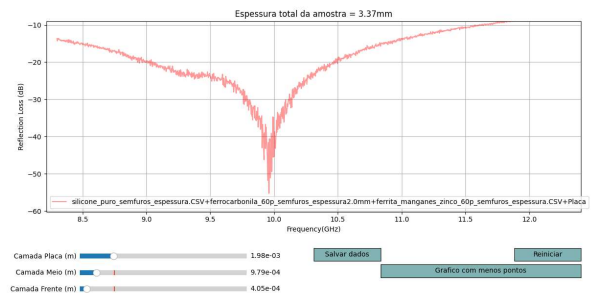


Fig. 6. Tela principal do *software*

O gráfico apresentado na Fig. 6 representa perda por reflexão do conjunto de amostras de silicone, ferrocarbonila e ferrita manganês-zinco, como mostrado na Fig. 4. A banda analisada neste trabalho é a X, porém, o *software* permite a análise em demais bandas como Ku, K e Ka, conforme a faixa de frequência dado pelo arquivo de *input*. A definição da posição de cada amostra (encostada na placa metálica, meio ou frente) é definida pelo pesquisador usuário do *software*. Isso é feito no momento do *input* dos dados do VNA.

Sendo assim, após a realização das simulações de diferentes espessuras, para cada camada, e de diferentes configurações de posição das amostras, nós obtemos o gráfico apresentado na Fig. 6. Como pode ser observado nesse gráfico a menor perda por reflexão alcançada foi de -55 dB para espessura de 0,405 mm de silicone, 0,979 mm de ferrocarbonila e 1,98 mm de ferrita MnZn, com a seguinte configuração: ferrita MnZn encostada na placa metálica, ferrocarbonila no meio e silicone na frente.

Na Fig. 7 é mostrado um gráfico com 100 pontos. Trata-se do mesmo gráfico exibido na Fig. 6, contudo, como o próprio nome sugere, com uma quantidade reduzida de pontos. Esta redução visa melhorar a visualização e interpretação dos dados pelo pesquisador.

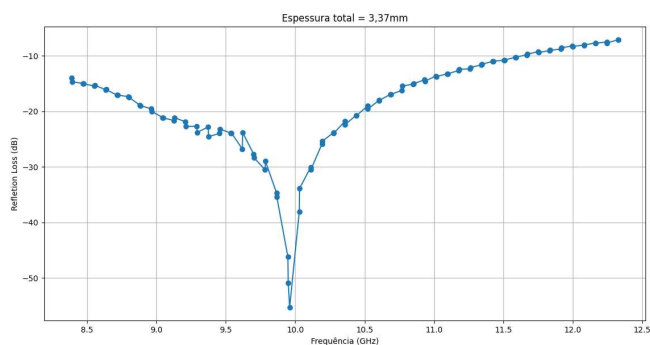


Fig. 7 Gráfico com menos pontos

IV. CONCLUSÃO

O trabalho apresenta um *software* de análise de Materiais Multicamadas (MCM) para aplicações em tecnologias furtivas. Cabe destacar que os resultados apresentados se limitaram a banda X, porém, o *software* permite a entrada de dados em outras bandas como Ku, K e Ka, permitindo a análise em diferentes contextos operacionais. Utilizando uma amostra composta por silicone puro, ferrocarbonila e ferrita manganês-zinco, conduzimos uma análise detalhada por meio de microscopia eletrônica de varredura e medidas no Analisador de Rede Vetorial (VNA). As ferramentas desenvolvidas, incluindo um *software* específico, permitiram a simulação dinâmica de diferentes espessuras e posicionamentos das camadas, resultando em uma redução substancial da reflexão eletromagnética, evidenciada pela obtenção de -55,25 dB na perda por reflexão.

A abordagem metodológica apresentada integra medições experimentais precisas e cálculos computacionais e abre caminho para o desenvolvimento de materiais com propriedades furtivas, essenciais para reduzir a detectabilidade de veículos e dispositivos em aplicações militares e

aeronáuticas. A pesquisa fornece uma base para futuras investigações e desenvolvimento de soluções inovadoras em tecnologia *furtiva*, evidenciando a importância da engenharia de materiais e simulação computacional na otimização das propriedades eletromagnéticas de MCMs

REFERÊNCIAS

- [1] L. Jin, Y. Zhao, C. Chen, J. Zhang, Y. He, C. Yin, N. Wu, J. Tang, S. Xing, "Application, development, and challenges of furtiva materials/structures in next-generation aviation equipment", *Applied Surface Science Advances*, v.19, n.100575, 2024.
- [2] T. Chen, F. Zhou, X. Cai, T. Liu, K. Qian, Z. Zhang, L. Duan, X. Dai, K. Yu, "Flexible electromagnetic wave absorption material: Multiscale synergistic approach to achieve whole X-band absorption and thermal furtiva property". *Carbon*, v. 210, n. 118048, 2023.
- [3] B. H. K. Lopes. "Estudo da Capacidade de Absorção de Onda Eletromagnética por Particulados de Ferrita Mnzn e Ferrocarbonila Dispersos em Matriz de Borracha de Silicone na Faixa de Frequência Referente a Banda X (8,2-12,4 GHz)". Mestrado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, p. 130, 2019.
- [4] A. Toktas, D. Ustun, E. Yigit, K. Sabanci, M. Tekbas, "Optimally Synthesizing Multilayer Radar Absorbing Material (RAM) Using Artificial Bee Colony ALgorithm" 2018 XXIIIrd International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory (DIPED). Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8543261>> Acesso em: 28/06/2024
- [5] E.L. Nohara, M.C. Rezende, "Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética (2-40 GHz) Baseados em Ferrocarbonila", Disponível em: <<https://www.sige.ita.br/edicoes-antiores/2006/st/GE021.pdf>> Acesso em: 28/06/2024.
- [6] Simulação de Materiais em Multicamadas para Controle de Interferência Eletromagnética Disponível em: <<https://github.com/GlauberLanziloti/MultiCamadas>> Acesso em: 28/06/2024