



Desenvolvimento de compósitos híbridos como materiais absorvedores de radiação eletromagnética para o 5G

Ana Clara Felizardo de Paula¹, Giovana Silva Cembranelli², Felipe de Moraes Yamamoto³, Braulio Haruo Kondo Lopes³, Maurício Ribeiro Baldan³; Chen Ying Yan²

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

Aluna de Iniciação Científica do Departamento de Materiais.

²Faculdade de Tecnologia de São José dos Campos, São José dos Campos, SP, Brasil

ana.paula5@fatec.sp.gov.br

Resumo. *A implantação do 5G trouxe benefícios e suporte a várias aplicações, mas também gerou preocupações sobre a poluição eletromagnética devido à necessidade de mais antenas e estações de base. Devido a essa preocupação, a demanda por materiais absorvedores de radiação tem crescido. O objetivo deste trabalho é investigar aplicar esses materiais e como isto afeta sua capacidade de absorver radiação eletromagnética. Portanto, realizou-se uma caracterização abrangente, que inclui a avaliação das propriedades de permissividade elétrica e permeabilidade magnética. Além da aplicação do método da refletividade para identificar a faixa de frequência em que o material apresenta maior capacidade de absorção. Por fim, simulou-se essas amostras em diferentes espessuras no software FEKO, obtendo bons resultados, com pico de -47,67 dB na frequência de 24,12 GHz para a amostra com 5% de cobre e um pico de -37,62 dB na frequência de 20,41 GHz para a amostra com 20% de cobre.*

Palavras-chave: 5G; Material Absorvedor; Banda K; Cobre; Ferrocarbonila.

1. Introdução

A implantação do 5G, a quinta geração de tecnologia de comunicação móvel, trouxe consigo inúmeros benefícios, incluindo maior velocidade de conexão, menor latência e capacidade de suportar uma ampla gama de aplicações, como a Internet das Coisas (IoT) e carros autônomos. No entanto, também tem suscitado preocupações em relação à poluição eletromagnética e seus possíveis impactos na saúde e no meio ambiente (Zhao, 2022). O 5G opera em frequências mais altas, na faixa de ondas milimétricas, o que resulta em ondas eletromagnéticas com menor capacidade de penetração em comparação com tecnologias de redes anteriores com maior potencial de transmissão de dados (Xia, 2022). Para garantir uma cobertura eficaz, torna-se necessário o aumento do número de antenas e estações de base, o que, por sua vez, amplia a exposição a campos eletromagnéticos. A poluição eletromagnética refere-se a esta exposição e, embora os níveis de radiação não ionizante emitidos por essas fontes sejam considerados



seguros de acordo com muitos órgãos reguladores, a exposição constante e crescente a essas emissões tem gerado preocupações sobre seus potenciais efeitos a longo prazo (Gao, 2022).

Neste contexto, a demanda por materiais absorvedores de radiação eletromagnética tem aumentado significativamente à medida que as redes 5G e outras tecnologias de comunicação sem fio se expandem. Esses materiais são projetados para absorver e dissipar a energia das ondas eletromagnéticas, contribuindo para reduzir a exposição a campos eletromagnéticos em áreas onde a densidade de antenas e dispositivos de comunicação é alta. Outrossim, ao reduzir a reflexão e a interferência das ondas eletromagnéticas, esses materiais podem otimizar a eficiência das redes de comunicação, significando menos perda de sinal e uma melhoria geral na qualidade da conexão. A aplicação eficaz de materiais absorvedores de radiação pode contribuir para uma convivência mais segura e eficiente com a crescente complexidade das redes de comunicação (Ryu, 2022).

Em vista disto, a procura e estudo de materiais que atuam desta forma é notória. A ferrocarbonila é um composto químico que contém ferro e monóxido de carbono (Jiao, 2022). É conhecida por suas propriedades magnéticas e tem sido estudada em relação à absorção de ondas eletromagnéticas. Essa substância pode ser usada em materiais absorvedores de radiação eletromagnética devido à sua capacidade de amplificar a magnetização do material, o que, por sua vez, potencializa a absorção de ondas eletromagnéticas em certas faixas de frequência. Entretanto, é imprescindível incorporar um aditivo, o qual permite que o desempenho do material seja superior, mesmo com concentração baixa deste componente. Para desenvolver um material de blindagem é essencial a utilização de um material dielétrico como matriz e um material condutor como aditivo e, por isso, o compósito híbrido tem sido bastante estudado (Portes et al., 2019).

Atualmente, esta prática nos permite criar o que conhecemos como compósito híbrido, definido pela incorporação de partículas elétricas e magnéticas em um único material, conferindo-lhe qualidades como leveza, resistência mecânica e excelente capacidade de resposta às interações eletromagnéticas (Lopes et al., 2020). A borracha de silicone é um material de elastômero sintético que possui várias propriedades desejáveis, tornando-o valioso em diversas aplicações industriais e técnicas. Ela demonstra baixa densidade, estabilidade química, alta resiliência e boa processabilidade, permitindo, assim, a redução de vibrações mecânicas, resistência à corrosão e processamento de geometrias complexas (Chen *et al.*, 2018). Ademais, o cobre é um excelente condutor elétrico e possui algumas propriedades eletromagnéticas que são vantajosas para a sua aplicação em materiais absorvedores de radiação eletromagnética, especialmente quando se deseja absorver radiação em frequências específicas.

Neste trabalho, investigou-se um material compósito que combina aditivos elétricos, o pó de cobre, e aditivos magnéticos, pó de ferrocarbonila, dispersos em uma matriz polimérica de silicone. O principal objetivo é analisar como a composição desse material influencia sua capacidade de absorver radiação eletromagnética. Deste modo, há uma caracterização abrangente, incluindo a avaliação das propriedades de permissividade elétrica e permeabilidade magnética usando o modelo NRW. Além disso, aplicou-se o método da refletividade para identificar a faixa de frequência na qual o material demonstrou o maior potencial de absorção.

2. Metodologia

No presente estudo, foram produzidas amostras compostas por uma matriz de polidimetilsiloxano (silicone), com 70% de ferrocarbonila e 5% de cobre, e com 70% de ferrocarbonila e 20% de cobre. A ferrocarbonila, Figura 1(a), possui caráter de aditivo



14° WETE

Workshop em Engenharia e Tecnologia Espaciais

magnético, o cobre possui caráter de aditivo elétrico, Figura 1(b), e o silicone possui caráter de matriz dielétrica, Figura 1 (c). Para a análise dos resultados, utilizou-se um Analisador de Rede Vetorial, Figura 2(a), e um guia de onda retangular da Banda K, Figura 2(b) para caracterizar propriedades eletromagnéticas nas frequências da banda K (18GHz - 26,5GHz). Além disso, foi simulada a capacidade de atenuação eletromagnética das amostras em diferentes espessuras utilizando o software FEKO, Figura 3, utilizando o setup referente ao ensaio de refletividade em espaço livre.

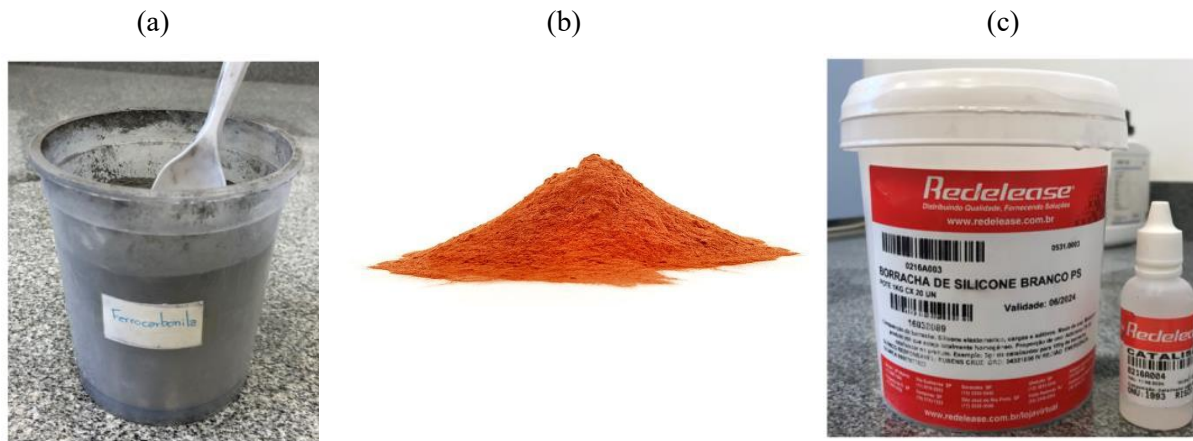


Figura 1 – materiais utilizados, (a) pó de cobre, (b) ferrocarbonila, e (c) silicone.

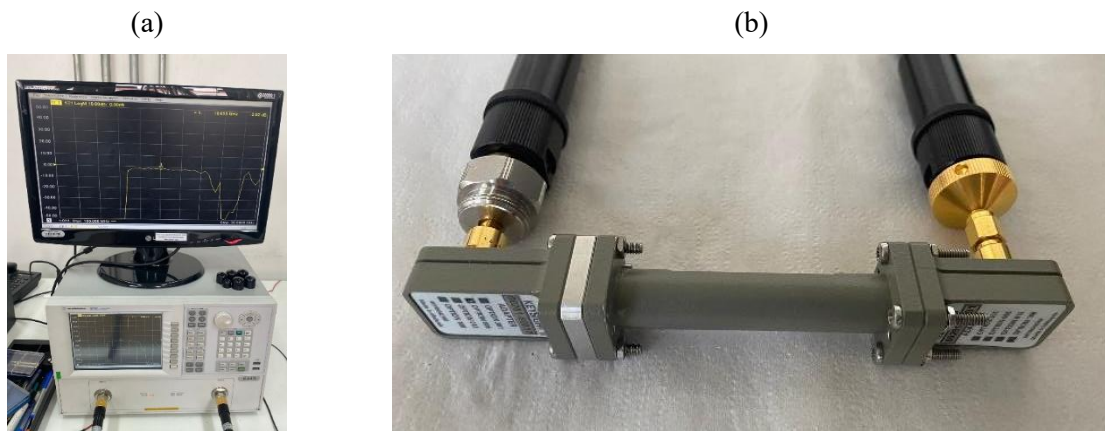


Figura 2 – Equipamentos utilizados, (a) Analisador de rede vetorial, e (b) guia de onda retangular.

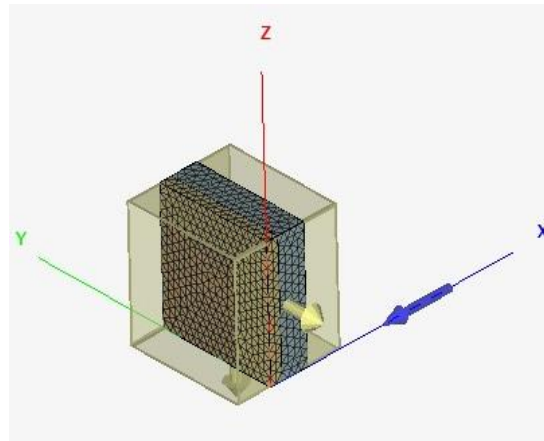


Figura 3 – Setup das simulações eletromagnéticas, utilizando o FEKO.

As etapas do processamento das amostras estão expressas na Figura 4. O controle da proporção da massa dos particulados magnéticos e elétricos foi realizado através de uma balança analítica. Após a cura do silicone, as amostras foram caracterizadas pelo VNA e os resultados avaliados.

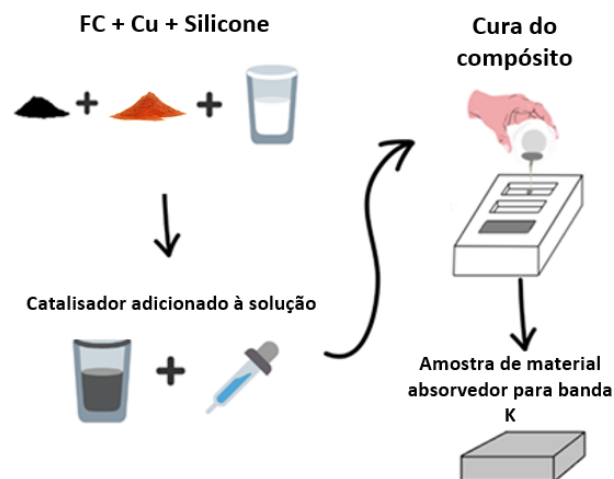


Figura 4 – representação esquemática do processo de produção das amostras.

Nesta etapa do trabalho, iniciou-se a caracterização das amostras por meio do VNA na faixa de 18GHz - 26,5GHz (Banda K). A caracterização eletromagnética foi realizada usando o modelo matemático de Nicholson – Ross – Weir (NRW) para um guia de onda retangular e o ensaio de refletividade. O NRW utiliza os sinais referentes aos parâmetros S medidos no VNA, através do guia de onda retangular. O parâmetro S descreve a razão entre o potencial de uma determinada radiação incidente na amostra e os potenciais dos respectivos sinais de respostas devido aos fenômenos de reflexão e transmissão (Plyushch et al., 2019). Desta forma a partir das respostas em termos de reflexão e transmissão, o modelo NRW permite a definição das propriedades permissividade elétrica complexa ($\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$) e permeabilidade magnética complexa ($\mu = \mu' - j\mu''$) (Chen et al., 2019). A relação entre a parcela real e a parcela imaginária das propriedades permissividade e permeabilidade é feita através da tangente de perda para análise da razão entre os fatores dissipativos (ϵ'' , μ'') e capacitivos (ϵ' , μ') no interior do material. As tangentes de perdas elétrica e magnética são definidas conforme as equações 1 e 2.



$$\tan \delta\varepsilon = (\varepsilon''/\varepsilon') \quad \text{Eq. 1}$$

$$\tan \delta\mu = (\mu''/\mu') \quad \text{Eq. 2}$$

O potencial de absorção eletromagnética foi caracterizado a partir do método de refletividade no guia de onda retangular. Este método é realizado com a utilização de uma placa metálica atrás da amostra dentro do guia de onda retangular, no qual a placa metálica impede que ocorra o fenômeno de transmissão. Na refletividade, o analisador de rede realiza a medição do sinal refletido e o sinal não refletido é definido como o potencial de absorção (Chen et al., 2019).

O método de refletividade é definido matematicamente pela equação 3 utilizando a relação de impedâncias descritas pela equação 4. Onde Z_{in} é a impedância do meio material, μ_r é a permeabilidade absoluta relativa, ε_r é a permissividade absoluta relativa, t é a espessura da amostra, f é a frequência analisada e c é a velocidade da luz (Ge et al., 2018).

$$\text{Refletividade (dB)} = 20 \log_{10} \left| \frac{Z_{in} - 1}{Z_{in} + 1} \right| \quad \text{Eq. 3}$$

$$Z_{in} = \sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}} \tanh \left\{ j \left(\frac{2\pi f t}{c} \right) \sqrt{\mu_r \varepsilon_r} \right\} \quad \text{Eq. 4}$$

3. Resultados e Discussão

Os resultados de permissividade elétrica e permeabilidade magnética foram analisados ao longo da banda K, conforme Figura 5. Apenas para comparação dos resultados, os valores de permissividade e permeabilidade da amostra de 70% (de trabalhos anteriores) estão apresentados junto às amostras do presente material. Os resultados indicam um pequeno aumento no caráter elétrico capacitivo (ε') para a amostra com 20% de cobre e uma redução com 5% de cobre, Figura 5 (a). A parcela real da permeabilidade (μ') não variou de maneira significativa. Contudo, o aumento da concentração de cobre teve uma influência positiva no fator dissipativo magnético (μ''), Figura 5 (b), alcançando um valor médio de 0,4 para amostra com 5% de cobre, Figura 5 (d). Os resultados referentes a tangente de perda indicam que o aumento da concentração de cobre reduziu o fator de perda elétrico ($\delta\varepsilon$) alcançando o valor de -0,05, porém aumentou o fator de perda magnético ($\delta\mu$) com picos de 0,27, conforme Figura 5 (e) e (f). Desta forma, é possível afirmar que o uso do aditivo elétrico aumentou os fenômenos magnéticos, porém não houve influência no caráter elétrico do material. Este fato pode estar associado à presença de poros no interior do material que impossibilitaram a criação de caminhos elétricos para concentração utilizada. Todavia, os fenômenos magnéticos não foram influenciados negativamente e isto pode ser associado ao caráter indutivo destes fenômenos.

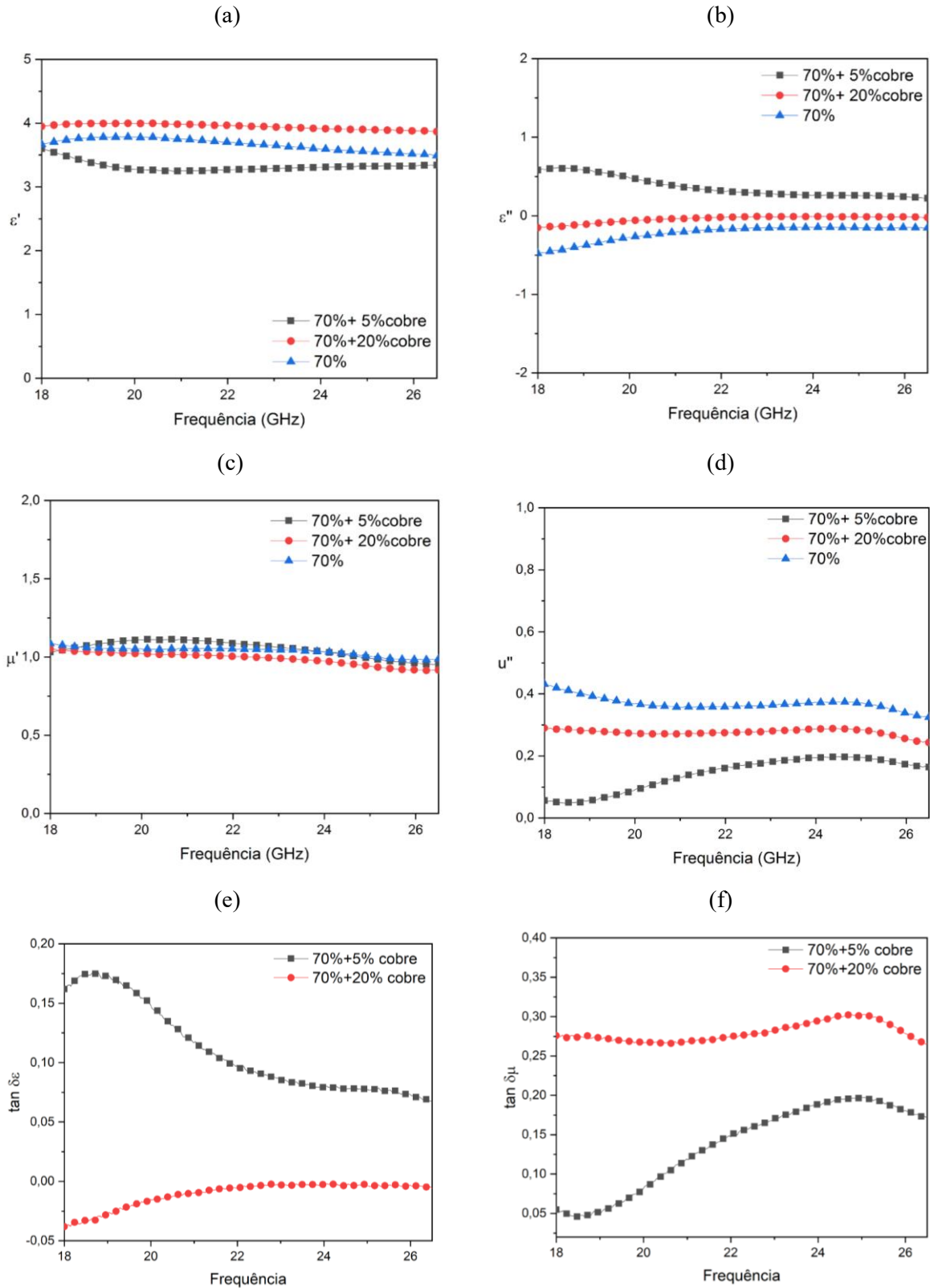


Figura 5 – Resultados de parcela (a) real e (b) imaginária da permissividade, parcela (c) real e (d) imaginária de permeabilidade, e tangentes de perda (e) elétrica e (f) magnética, das amostras.



Em relação ao resultado do ensaio de refletividade analisado no VNA, a maior atenuação foi em -11,65609 dB para a amostra com 5% de cobre, já para a amostra com 20% obteve a maior atenuação em -19,94683 dB, ambos ao final da Banda.

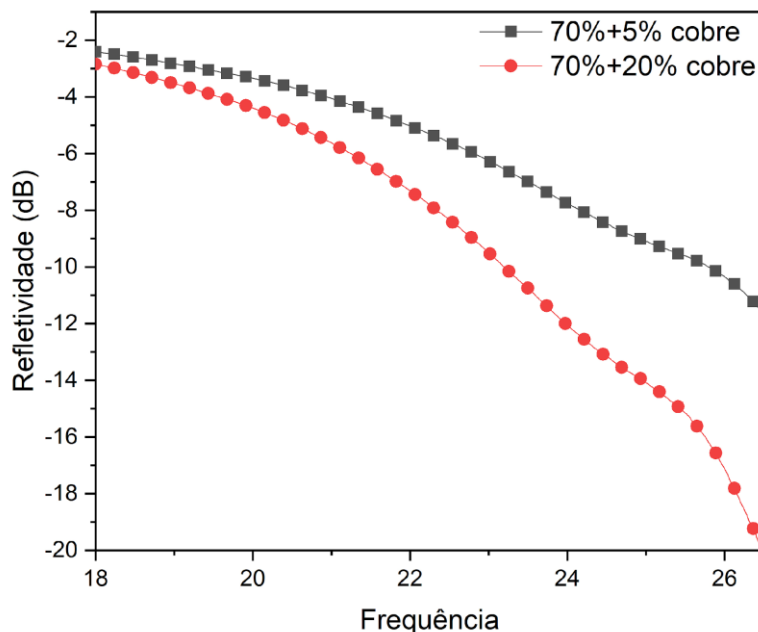


Figura 6 – Resultados medidos das amostras no ensaio de refletividade.

No entanto, ao simularmos essas amostras em diferentes espessuras, houve resultados muito superiores, obtendo-se um pico de -47,67 dB (99,9982% de absorção) na frequência de 24,12 GHz para a amostra com 5% de cobre e um pico de -37,62 dB (99,9827% de absorção) na frequência de 20,41 GHz para a amostra com 20% de cobre. Este fenômeno indica que uma menor concentração de cobre (5%) é capaz de atenuar mais radiação eletromagnética. Isto se deve ao fato de o cobre ser um material condutor, sendo eficaz na atenuação dessas radiações devido à sua capacidade de refletir a radiação incidente no interior do material entre os poros. Em poucas concentrações, é possível indicar que ainda há cobre para refletir. Já em concentrações mais altas, o cobre fica mais denso e absorve a radiação ao invés de refleti-la, podendo haver um resultado não tão relevante.

Tabela 1 – Análise dos melhores resultados do ensaio de refletividade simulado

Material	Frequência do Pico	Atenuação	Espessura
70% Ferrocarbonila + 5% de Cobre	24,12 GHz	-47,67 dB	5mm
70% Ferrocarbonila + 20% de Cobre	20,41 GHz	-37,62 dB	5,3mm

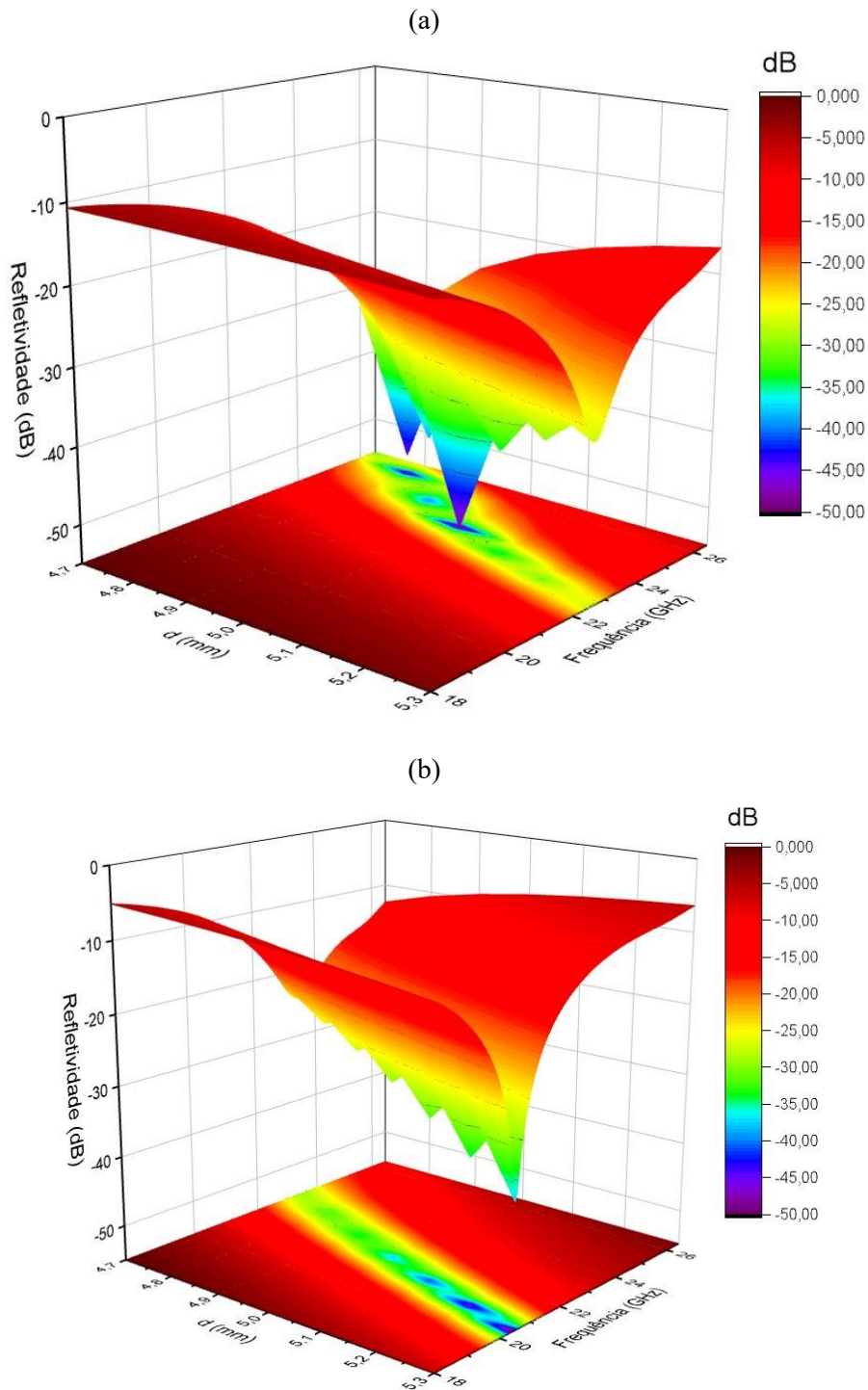


Figura 7 - Ensaio de refletividade simulado da amostra com 70% de Ferrocenone e (a) 5% de cobre e (b) 20% de cobre, em diferentes espessuras.

Os resultados apresentam o potencial do material estudado para a faixa de frequência do 5G. A Tabela 1 apresenta os melhores resultados simulados para ambas as concentrações de cobre e suas respectivas frequências e espessuras.



4. Conclusão

No presente estudo, foi possível o desenvolvimento de um material com alta capacidade de atenuação ao longo da Banda K. Foi realizada uma análise de composição desse material e descobriu-se o quanto ela influencia em sua capacidade de absorver radiação eletromagnética. Observou-se que o uso do aditivo elétrico aumentou os fenômenos magnéticos que podem ser associados a fenômenos indutivos, obtendo bons valores ao analisarmos a permeabilidade magnética. Feitas as avaliações das propriedades de permissividade elétrica e permeabilidade magnética usando o modelo NRW e empregado o método da refletividade para identificar a faixa de frequência na qual o material demonstrou o maior potencial de absorção, notou-se que o material absorvedor composto obteve a maior atenuação em -11,65609 dB para a amostra com 5% de cobre. Já para a amostra com 20% obteve a maior atenuação em -19,94683 dB. No entanto, ao simularmos essas amostras em diferentes espessuras no software FEKO, houve resultados muito superiores, obtendo-se um pico de -47,67 dB na frequência de 24,12 GHz e espessura de 5,3 mm para a amostra com 5% de cobre e um pico de -37,62 dB na frequência de 20,41 GHz para a amostra com 20% de cobre e espessura de 5 mm.

***Agradecimentos:** O presente projeto foi desenvolvido com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) através da concessão de bolsa de estudo de Iniciação Científica, nº de processo 158546/2023-7. Os autores agradecem também a Finep, ao CNPq e a ALTAIR pelas licenças do software.*

Referências

- ZHAO, Yue et al. A novel strategy in electromagnetic wave absorbing and shielding materials design: multi-responsive field effect. **Small Science**, v. 2, n. 2, p. 2100077, 2022.
- ZHAO, Biao et al. Lightweight graphene aerogels by decoration of 1D CoNi chains and CNTs to achieve ultra-wide microwave absorption. **Carbon**, v. 176, p. 411-420, 2021.
- CHEN, C. Y. et al. (2018) “Microwave absorption properties of holey graphene/silicone rubber composites”, 135, pages 119–128. *Composites Part B: Engineering*. doi: 10.1016/j.compositesb.2017.10.001.
- PLYUSHCH, A. et al. (2019) “Ultra-Light Reduced Graphene Oxide Based Aerogel/Foam Absorber of Microwave Radiation”, pages 213. *Materials*. doi: 10.3390/ma12020213.
- CHEN, H. et al. (2019) “Closed-form representation for equivalent electromagnetic parameters of biaxial anisotropic honeycomb absorbing materials”, page. 085804. *Materials Research Express*. doi: 10.1088/2053-1591/ab2020.
- ZHAO, Zehao et al. Optimal particle distribution induced interfacial polarization in bouquet-like hierarchical composites for electromagnetic wave absorption. *Carbon*, v. 186, p. 323-332, 2022.
- XIA, Long; FENG, Yuming; ZHAO, Biao. Intrinsic mechanism and multiphysics analysis of electromagnetic wave absorbing materials: New horizons and breakthrough. *Journal of Materials Science & Technology*, v. 130, p. 136-156, 2022.
- GAO, Tong et al. Iron/silicon carbide composites with tunable high-frequency magnetic and dielectric properties for potential electromagnetic wave absorption. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, v. 5, n. 2, p. 1158-1167, 2022.



14° WETE

Workshop em Engenharia e Tecnologia Espaciais

RYU, Seung Han et al. Absorption-dominant, low reflection EMI shielding materials with integrated metal mesh/TPU/CIP composite. *Chemical Engineering Journal*, v. 428, p. 131167, 2022.

JIAO, Zibao et al. Achieving ultra-wideband and elevated temperature electromagnetic wave absorption via constructing lightweight porous rigid structure. *Nano-Micro Letters*, v. 14, n. 1, p. 173, 2022.