

# Estudo de um Compósito Magnético Poroso para Alta Absorção em Micro-ondas para a Banda Ka

Thiago Ferreira Claudiano<sup>1</sup>, Fernanda Ribeiro Freitas<sup>1</sup>, Mariana Helena de Oliveira Antunes<sup>2</sup>, Felipe Morais Yamamoto<sup>3</sup>, Giovana Silva Cembrenelli<sup>3</sup>, Braulio Haruo Kondo Lopes<sup>3</sup>, Maurício Ribeiro Baldan<sup>3</sup>, Chen Ying An<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Instituto Federal de Educação, Tecnologia e Ciência de São Paulo – IFSP, São José dos Campos/SP – Brasil

<sup>2</sup>Faculdade de Tecnologia do Estado de São Paulo – FATEC, São José dos Campos/SP – Brasil

<sup>3</sup>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos/SP – Brasil

**Resumo** – A implantação do 5G trouxe consigo inúmeros benefícios, porém tem gerado preocupações em relação à poluição eletromagnética e seus possíveis impactos na saúde e no meio ambiente, e opera em frequências mais altas, em ondas milimétricas. Para melhor cobertura, torna-se necessário o aumento do número de antenas, ampliando a exposição a campos eletromagnéticos. Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de compósitos porosos, a base de aditivos magnéticos e elétricos, dispersos em silicone para redução da poluição eletromagnética. Foram produzidas três concentrações de amostras com particulados de ferro carbonila (FC), variando de 50%, 60% e 70% de massa. A caracterização eletromagnética foi realizada através de um Analisador de Rede Vetorial e guia de onda retangular modelo WR28. A faixa de frequência analisada foi de 26,5 a 40 GHz (banda Ka). O material alcançou -31,65 dB de atenuação para a frequência de 38,57 GHz, com concentração de 70% de FC.

**Palavras-Chave** – Materiais absorvedores de radiação eletromagnética; Banda Ka; Material compósito.

## I. INTRODUÇÃO

O avanço da tecnologia 5G tem sido notável, oferecendo maior capacidade de transmissão de dados. No entanto, a proliferação de antenas associadas ao 5G tem gerado níveis sem precedentes de ruído eletromagnético [1]. Em resposta a esse desafio, pesquisas estão sendo conduzidas para desenvolver materiais absorvedores de radiação eletromagnética (MARE), e alguns trabalhos apresentam o foco em materiais porosos para otimizar a atenuação [2]. Embora o 5G traga benefícios como maior taxa de transferência e menor latência, ele também levanta preocupações sobre poluição eletromagnética devido às frequências mais altas em que opera, como a faixa de 26 GHz (faixas de ondas milimétricas). Embora os níveis de radiação não ionizante sejam considerados seguros, a exposição constante gera preocupações sobre possíveis efeitos em longo prazo na saúde [3]. A demanda por materiais absorvedores tem crescido à medida que as tecnologias de comunicação sem fio se expandem. Esses materiais são essenciais para reduzir a exposição a campos eletromagnéticos, especialmente em áreas com alta densidade de antenas e dispositivos de comunicação [4]. O presente trabalho apresenta um estudo sobre a influência de índices de porosidades na capacidade de atenuação. O principal material utilizado dentre os descritos na literatura é a ferrocobalita (FC), que se destaca como aditivo para MARE. O presente estudo tem como base o desenvolvimento de compósitos magnéticos com matriz dielétrica de silicone e dopantes magnéticos de FC, nas proporções em massas

controladas em 50%, 60% e 70%. As porosidades são incorporadas ao silicone ao realizar o processo de cura com aplicação de vácuo (pressões negativas). Desta forma, o desenvolvimento das amostras foi manipulado por variações de pressão durante o processo de cura em 5 pressões de -50mmHg, -150mmHg, -250mmHg, -350mmHg, e -450mmHg, e uma amostra de referência sem poros (0mmHg). A ferrocobalita tem sido foco de interesse em aplicações eletrônicas de MARE, especialmente em bobinas de alta frequência. Derivada da ferro-pentacobalita, essa substância é composta principalmente de ferro, responsável pela sua natureza magnética. Dependendo do método de síntese, sua natureza magnética pode variar entre mole e dura. Neste estudo, a opção foi pela ferrocobalita magnética mole, obtida em atmosfera contendo hidrogênio, nitrogênio, carbono e oxigênio. Essa escolha tende a aumentar a permeabilidade e a capacidade de magnetização, fundamentais para sua eficácia em absorver radiação eletromagnética [5].

Ademais, a borracha de silicone, derivada da combinação de cloreto de metila e areia de silício no início do século XX, é uma estrutura heterogênea composta por átomos de silício (Si) e oxigênio (O). Grupos metil ligados ao silício conferem-lhe resistência química [10]. Classificada como elastômero, exibe resistência à tração de 10 a 100 psi e estabilidade térmica entre -40°C e 200°C, dependendo do dopante [1]. Sua processabilidade permite revestir peças complexas e sua natureza elastomérica a torna adequada como redutor de vibrações. As ligações covalentes (Si-O) na cadeia polimérica a tornam útil como material isolante em diversas aplicações [6].

## II. METODOLOGIA

### A. Desenvolvimento das amostras com poros

No presente estudo foram produzidas 18 amostras a partir de 3 concentrações em massa de ferrocobalita, variando em 50%, 60% e 70%, e 6 pressões negativas conforme descrito na Tabela I e Tabela II. Para induzir o desenvolvimento de bolhas no silicone e gerar poros na estrutura final do material compósito, cada amostra foi sintetizada com a aplicação de vácuo, com a pressão variando entre 0 mmHg a -450 mmHg, representados na Tabela II. As amostras da banda Ka foram produzidas nas dimensões do guia de onda retangular acoplado a um Analisador de Rede Vetorial (VNA).

Os materiais utilizados foram a Ferrocarbonila da empresa BASF, Fig. 1(a), e a borracha de silicone da empresa Redelease, Fig. 1(b). A massa proporcional de cada material, silicone e ferrocarbonila, foi aferida com o uso de uma balança analítica da marca AAKER, Fig. 1(c).



(a) (b) (c)

Fig. 1. Materiais para desenvolvimento das amostras, (a) Ferrocarbonila, (b) Silicone Branco e (c) Balança Analítica.

Tabela I. VARIAÇÃO DA PORCENTAGEM EM MASSA DE FERROCARBONILA

% Massa do Material Magnético	% Volume (Ferrocarbonila)
50	12,7
60	21,4
70	26,9

Tabela III. VARIAÇÃO DE PRESSÃO DO VÁCUO

Amostra	Pressão (mmHg)	Amostra	Pressão (mmHg)
1	-50	4	-350
2	-150	5	-450
3	-250	6	Sem poros

O processo de síntese do compósito é apresentado na Fig. 2. Após medir a massa dos materiais nas proporções desejadas, a FC e o silicone branco são misturados manualmente até alcançar a homogeneidade visual. O catalisador é então adicionado na proporção de 5% da massa do silicone, e o material é novamente agitado para sua homogeneização. O compósito é colocado em moldes com as dimensões do guia de onda para a banda de interesse (Ka) e curado sob a pressão especificada na Tabela II. Amostras com concentrações de 50%, 60% e 70% foram preparadas conforme a metodologia da Fig. 2, mostrando a capacidade de gerar poros em compósitos de silicone. Para o controle da porosidade, os materiais compósitos são colocados no recipiente de controle de pressão apresentado na Fig. 3, então é definida a pressão desejada para o experimento, verificando o manômetro. E assim que atingida a pressão, desliga-se a bomba de vácuo, deixando o material curar para atingir o resultado esperado.

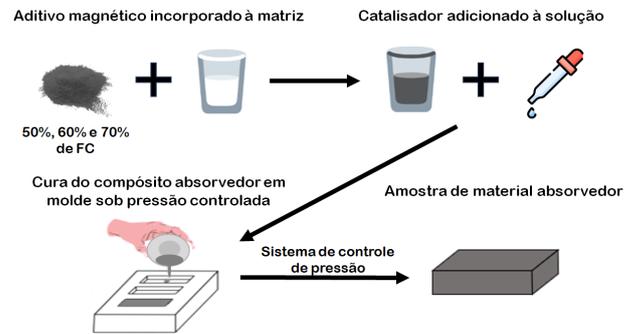


Fig. 1. Etapas dos processamentos de amostras



Fig. 2. Sistema de aplicação de vácuo.

## B. Propriedades eletromagnéticas

O Parâmetro-S foi utilizado para calcular a permeabilidade magnética complexa ( $\mu$ ) e a permissividade elétrica complexa ( $\epsilon$ ) na banda Ka (26,5 – 40 GHz), utilizando o método de Nicholson Ross Weir (NRW). A permissividade elétrica e a permeabilidade magnética são definidas como propriedades de um material e refletem seu comportamento macroscópico sob um campo elétrico, magnético ou eletromagnético. A variação na polarização das nuvens eletrônicas no interior do material devido à excitação gerada pelo campo aplicado está diretamente relacionada à capacidade de absorção de energia da radiação incidente pelo material [7]. Caracterizar essas propriedades é crucial para otimizar a absorção de um material compósito. As fórmulas  $\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$  e  $\mu = \mu' - j\mu''$  descrevem  $\epsilon$  e  $\mu$ , onde  $\epsilon'$ ,  $\mu'$  são partes reais e  $\epsilon''$ ,  $\mu''$  são partes imaginárias [8].

## C. Caracterização do comportamento eletromagnético

A Fig. 4 apresenta os sinais de transmissão e reflexão gerados no interior de um guia de onda retangular. O Parâmetro-S ou  $S_{ij}$  é definido como parâmetro de espalhamento da onda eletromagnética emitida em uma determinada amostra. A onda eletromagnética ao interagir com o material irá gerar dois sinais de resposta devido aos fenômenos de reflexão e transmissão [9]. O termo  $|S_{11}|^2$  é referente a parcela da energia emitida e refletida na porta 1, enquanto o parâmetro  $|S_{21}|^2$  refere-se a energia transmitida pela porta 1 e recebida na porta

2, ou seja, essa parcela de energia é resultado da transmissão da onda através do material analisado.

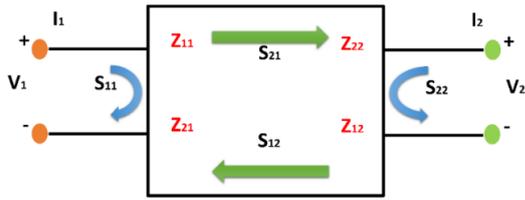


Fig. 3. Representação esquemática dos sinais referentes ao parâmetro S dentro de um guia de onda.

Na Fig. 5, são representados (a) o Analisador de Rede Vetorial (VNA) e (b) o kit da banda Ka.

(a)



(b)

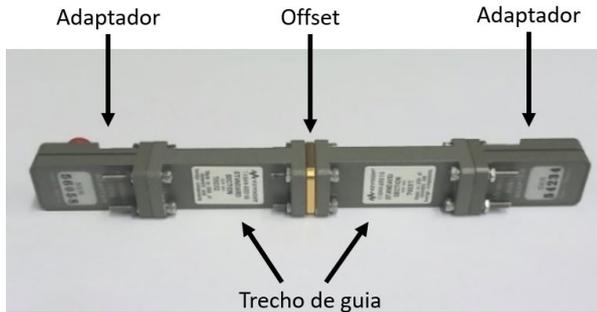


Fig. 4. (a) Analisador de Rede Vetorial e (b) Kit da banda Ka

#### D. Ensaio de refletividade

O potencial de absorção eletromagnética foi caracterizado pelo método de Refletividade no guia de onda retangular, onde uma placa metálica é colocada atrás da amostra e bloqueia a transmissão do sinal incidente. Desta forma, o sinal não refletido é definido como o potencial de absorção. O método é definido pelas Equações 1 e 2, onde  $Z_{in}$  é a impedância do meio material,  $\mu_r$  é a permeabilidade relativa,  $\epsilon_r$  é a permissividade relativa,  $t$  é a espessura da amostra,  $f$  é a frequência, e  $c$  é a velocidade da luz.

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

$$Z_{in} = \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \tanh \left\{ j \left( \frac{2\pi f t}{c} \right) \sqrt{\mu_r \epsilon_r} \right\} \quad (2)$$

### III. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Inicialmente, o foco deste estudo se dá pela investigação da capacidade de produção de amostras de materiais compostos com a presença controlada de poros, utilizando um método de síntese específico descrito na Fig. 2. Esse procedimento envolve a aplicação de pressão negativa durante o processo de cura do silicone. A relação entre as amostras e a pressão aplicada está detalhada na Tabela II.

#### A. Desenvolvimento de amostras porosas com concentração de 50%, 60% e 70% de FC.

As amostras estão apresentadas na Fig. 6, com concentração de 50%, 60% e 70% FC. A ordem das pressões aplicadas no vácuo é decrescente, com início em -50mmHg indo até -450 mmHg, conforme apresentadas na Tabela II, na qual relaciona o número de cada amostra para as curvas dos ensaios no VNA que serão discutidos nos próximos tópicos. Em todas as concentrações foram realizadas a fabricação de uma amostra (amostra 6) sem aplicação das pressões de vácuo para ser utilizada como a referência do material. A análise das amostras apenas com a variação do vácuo com 50% e 60%, já demonstrou um crescente aumento no diâmetro dos poros de forma controlada, sendo este o primeiro princípio do trabalho. Vale destacar que o próximo passo é realizar a caracterização eletromagnética das amostras.

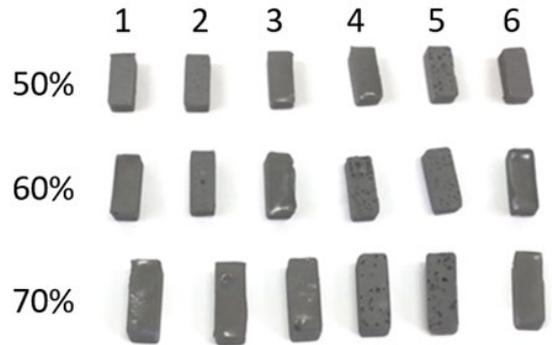


Fig. 5. Relação entre amostras e pressão

#### B. Caracterização Eletromagnética

O potencial de atenuação dos materiais desenvolvidos neste trabalho foi analisado por meio do ensaio de refletividade. Paralelamente, utilizando as equações  $R = |S_{11}|^2$ ,  $T = |S_{21}|^2$  e  $A = 1 - R - T$ , foram calculadas a capacidade de absorção (A), transmissão (T) e reflexão (R) do material através de ensaios de transmissão e reflexão, que estão representados na Fig. 7, Fig. 8 e Fig. 9. Essa análise foi realizada para entender

como a porosidade afeta o comportamento eletromagnético do compósito.

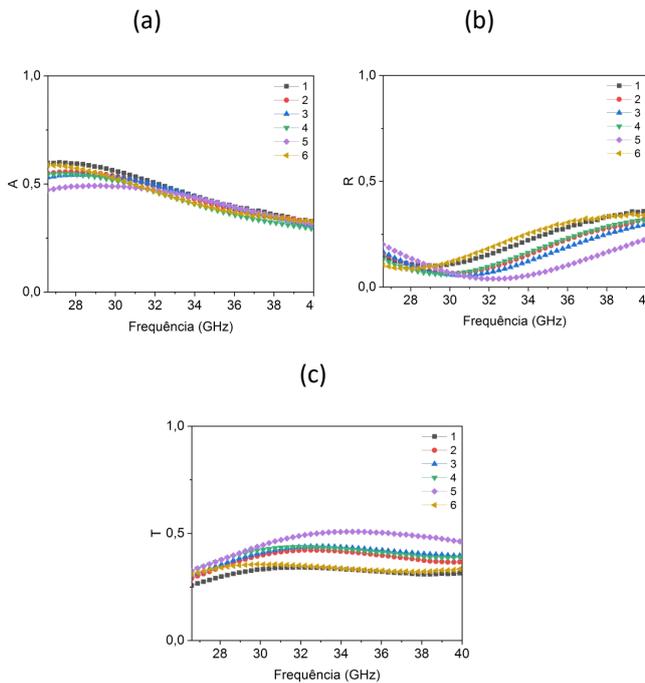


Fig. 6. Variação dos parâmetros A R T na banda Ka da amostra de 50%.

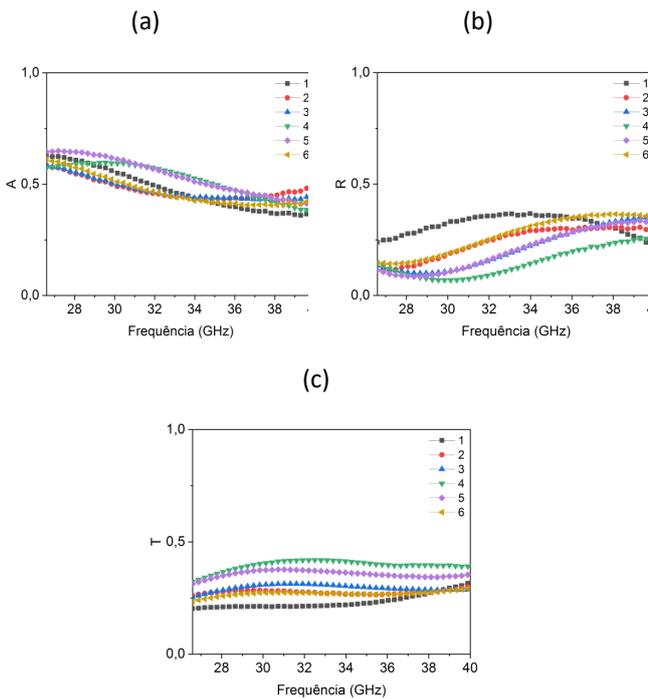


Fig. 7. Variação dos parâmetros A R T na banda Ka da amostra de 60%.

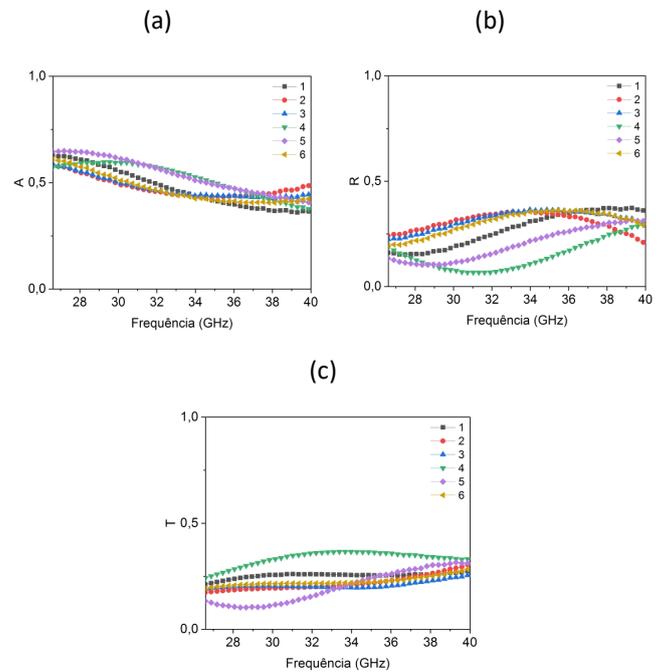


Fig. 8. Variação dos parâmetros A R T na banda Ka da amostra de 70%.

A partir dos gráficos nas Fig. 7, Fig. 8 e Fig. 9, é possível analisar que a maior absorbância se encontra na amostra 5 de 70% FC, alcançando uma absorção de 0,64 em 26,6 GHz. Já em relação à refletância, a amostra 1 de 70% FC se destaca por maior reflexão, com 0,37 de reflexão em 39,46 GHz. Para a transmitância, o melhor resultado se dá pela amostra 5 de 50% FC, com transmissão de 0,5 para 34,06 GHz.

A Transmitância reduziu em função do aumento da concentração, e para 70% de FC o aumento dos poros também apresentou influência negativa para a transmitância, evidenciado pelo menor valor de T para a amostra 5 na Fig. 9. Este fato demonstra que mesmo sendo a amostra com os maiores diâmetros de poros, o efeito gerado na Absorbância foi positivo em relação a presença de poros, o que pode estar associado ao espalhamento que estes poros agregaram a estrutura, resultando em maior perda de energia da onda. Desta forma podemos destacar que é possível relacionar um tamanho de poro ideal para aumentar o fator A na Banda Ka.

### C. Ensaio de refletividade

No ensaio de refletividade, uma placa metálica é posicionada atrás das amostras, como mostrado na Fig. 10. A espessura da amostra afeta os resultados, sendo inversamente proporcional à frequência, conforme descrito anteriormente na relação impedância da equação 2. Assim, é possível ajustar a frequência através da espessura do material para obter o maior pico de atenuação para resultar no casamento da impedância na equação 1. As amostras porosas apresentam múltiplas reflexões devido aos poros, o que aumenta a atenuação eletromagnética como pode ser observado na descrição da Fig. 10 comparando a diferença no caminho da onda eletromagnética dentro do material sem e com poros. Desta forma, com base nos dados é possível destacar que a presença

de poros no interior do material permite alterar o comportamento do material e com isso alterar a posição do pico de atenuação, como demonstrado na Fig. 14. E, as amostras com 70% foram as que mais apresentaram variações em função dos poros, fato este que indica que para maior concentração, maior a contribuição do poro, alcançando valores abaixo de -30 dB (amostra 5).

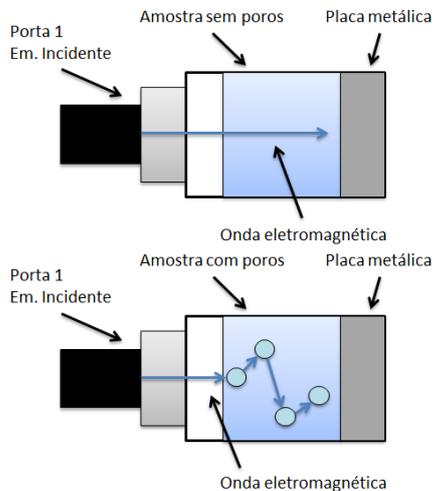


Fig. 9. Esquema de amostra com poros e amostra sem poros.

Na Fig. 15, no gráfico (a), observamos que a amostra 1 (-50mmHg) teve picos de absorção maiores (-15,19 dB na frequência 39,27 GHz) em comparação com a amostra 5, submetida a maior pressão (-450 mmHg), em que obteve um pico de -14 dB na frequência 38,6 GHz. Conforme aumentamos a quantidade de FC, os picos de absorção aumentam e se deslocam sobre a frequência. Neste caso, a que mais obteve sucesso foi a amostra 2 (-150 mmHg), obtendo picos de -25,76 dB na frequência 36,47 GHz para a amostra com 60% de FC, e para 70% de FC o pico foi de -31,65 dB na frequência de 38,57 GHz na amostra 5 (-450mmHg). O uso de poros em compósitos contribui para a atenuação da radiação eletromagnética, especialmente em amostras com 70% de FC, onde o maior pico foi observado na amostra mais porosa (-450 mmHg).

Na Tabela III, estão representados os melhores resultados obtidos no estudo.

Tabela III. MELHORES RESULTADOS

Concentração	Amostra	Frequência (GHz)	Potencial de atenuação (dB)
50% FC	1	39,27	-15,19
60% FC	2	36,47	-25,76
70% FC	5	38,57	-31,65

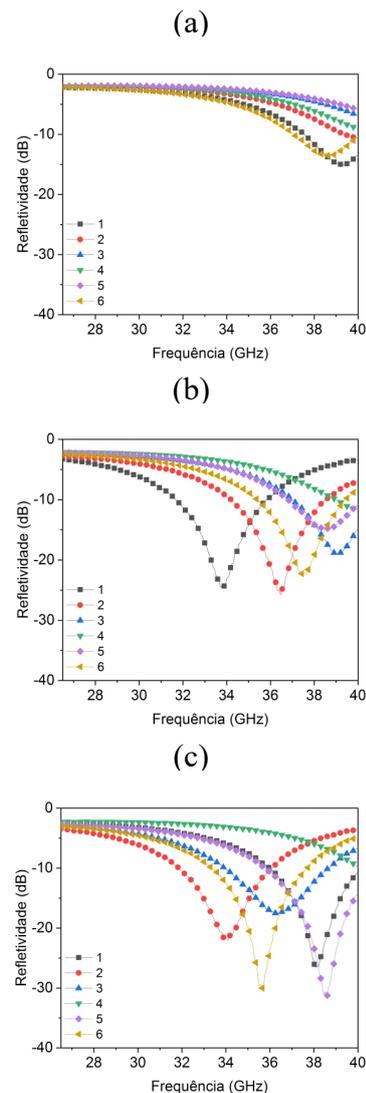


Fig. 10. Refletividade das amostras com concentrações de FC de (a) 50%, (b) 60% e (c) 70% para a banda Ka.

#### IV. CONCLUSÃO

A partir do método de cura das amostras de FC à vácuo, percebeu-se que os poros realmente possuem poder de melhorar a atenuação eletromagnética. Também é evidenciado que é possível fazer material compósito com controle de poros para diversas aplicações na indústria, conforme a necessidade. Este estudo permite enfatizar que o aumento da quantidade de FC melhora a qualidade do processo de porosidade. O material alcançou -31,65 dB de atenuação para a frequência de 38,57 GHz, com concentração de 70% de FC.

Thiago Ferreira Claudiano, [thiagofclaudiano@gmail.com](mailto:thiagofclaudiano@gmail.com); Fernanda; Ribeiro Freitas, [nanda.rf.freitas@gmail.com](mailto:nanda.rf.freitas@gmail.com); Mariana Helena de Oliveira Antunes, [mhelena.antuness@gmail.com](mailto:mhelena.antuness@gmail.com); Felipe Morais Yamamoto, [felipe.yamamoto@inpe.br](mailto:felipe.yamamoto@inpe.br); Giovana Silva Cembrenelli, [giovana.cembrenelli@inpe.br](mailto:giovana.cembrenelli@inpe.br); Bráulio Haruo Kondo Lopes, [brauliohkl@gmail.com](mailto:brauliohkl@gmail.com); Maurício Ribeiro Baldan, [mauricio.baldan@inpe.br](mailto:mauricio.baldan@inpe.br); Chen Ying An, [chen.an@inpe.br](mailto:chen.an@inpe.br).

O presente projeto foi desenvolvido com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

## REFERÊNCIAS

- [1] WU, T. et al. 3D Printed Polyimide Nanocomposite Aerogels for Electromagnetic Interference Shielding and Thermal Management. **Advanced Materials Technologies**, v. 8, n. 14, 24 jul. 2023.
- [2] YU, H. et al. Optimization of multiple attenuation mechanisms by cation substitution in imidazolic MOFs-derived porous composites for superior broadband electromagnetic wave absorption. **Journal of Materials Science and Technology**, v. 176, p. 176–187, 20 mar. 2024.
- [3] MARTEL, J. et al. Influence of electromagnetic fields on the circadian rhythm: Implications for human health and disease. **Biomedical Journal** Elsevier B.V., , 1 fev. 2023.
- [4] YAO, M. et al. A Study on Exposure to Electromagnetic Fields From User Equipment Antennas Above 100 GHz. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 65, n. 5, p. 1292–1299, 1 out. 2023.
- [5] SHEN, Y.; LI, Q.; XU, S. Microwave absorption properties of cementitious composites containing carbonyl iron powder (CIP) and fly ash: Formation and effect of CIP core-shell structure. **Cement and Concrete Composites**, v. 131, 1 ago. 2022.
- [6] ALHARSHAN, G. A. et al. Radiation shielding capacity of Li<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub>/GeO<sub>2</sub> glasses doped with rare earth oxides: Nuclear security applications. **Radiation Physics and Chemistry**, v. 204, 1 mar. 2023.
- [7] RIUS-BARTRA, J. M. et al. High-consistency silicone rubber with reduced Young's modulus. An industrial option to dielectric silicone rubber. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 140, n. 37, 5 out. 2023.
- [8] HUANG, X. et al. Evolutionary topology optimization of periodic composites for extremal magnetic permeability and electrical permittivity. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, v. 46, n. 3, p. 385–398, set. 2012.
- [9] PANWAR, V. et al. Electrical, dielectric, and electromagnetic shielding properties of polypropylene-graphite composites. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 115, n. 3, p. 1306–1314, 2 maio 2010.
- [10] BONALDI, R. R.; SIORES, E.; SHAH, T. Characterization of electromagnetic shielding fabrics obtained from carbon nanotube composite coatings. **Synthetic Metals**, v. 187, n. 1, p. 1–8, 2014.
- [11] LOPES, B. **Estudo da capacidade de absorção de onda eletromagnética por particulados de ferrita MnZn e ferro carbonila dispersos em matriz de borracha de silicone na faixa de frequência referente à banda X (8,2-12,4 GHz)**. [s.l.] Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2020.
- [12] SHIT, S. C.; SHAH, P. **A review on silicone rubber**. **National Academy Science Letters**, ago. 2013.