



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

Estudo sobre a influência da porosidade no potencial de atenuação eletromagnética de compósitos magnéticos a base de ferrocarbonila e silicone, na faixa de frequência referente à banda X (8,2-12,4 GHz) e Ku (12,4-18 GHz).

Mariana Helena de Oliveira Antunes

Relatório de Iniciação Científica do programa PIBIC, orientada pelo Dr. Chen Ying An e Me. Bráulio Haruo Kondo Lopes.

INPE
São José dos Campos
2024

Resumo

O desenvolvimento de materiais com boa capacidade de absorção de radiações eletromagnéticas é muito importante para os setores civil, militar e aeroespacial, devido à grande quantidade de radiação na qual alguns dispositivos são expostos. Os compósitos a base de aditivos magnéticos e elétricos dispersos em matrizes de polímeros dielétricos além de diminuir a energia das radiações, possuem baixo peso e boa processabilidade. Estes materiais são chamados de materiais absorvedores de radiação eletromagnética (MAREs) e podem ser constituídos a base de carbono, ferrita, negro de fumo, óxido de grafeno, fibras de carbono e polímero, unidos a algum filtro magnético e dielétrico. O presente trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de compósitos porosos, a base de aditivos magnéticos, dispersos em uma matriz de silicone branco. Foram produzidas amostras com particulados de ferrocarbonila (FC) com sua proporção sendo variada, utilizando porcentagens de 50, 60 e 70% em relação à quantidade em massa de silicone branco. Todas as amostras foram curadas utilizando uma bomba de vácuo, com o intuito de produzir poros, sobre as determinadas pressões: -50, -150, -250, -350 e -450 mmHg, e ainda, foram feitas amostras sem poros, para efeito de comparação. As dimensões das amostras foram baseadas nas medidas dos offsets utilizados neste trabalho para caracterização eletromagnética, sendo as amostras da banda X de 10,2 x 22,9 mm com espessura de 2mm, e as da banda Ku foram produzidas com as dimensões 15.8mm x 7.9mm e espessura 6.5mm. A caracterização eletromagnética foi realizada através de um Analisador de Rede Vetorial e guia de onda retangular WR90, e as faixas de frequência analisadas foram de (8,2 - 12,4 GHz), referente à banda X, como exemplo de aplicação, existem os satélites com Radar de Abertura Sintética (SAR), para observação da Terra como na meteorologia, agricultura, inteligência e segurança. E, também foi analisada a faixa de frequência de (12,4 - 18 GHz) referente à banda Ku, usada nos setores de telecomunicação e radares militares. Os resultados obtidos a partir do ensaio da refletividade apresentaram altos valores (>90%) de absorção da radiação eletromagnética e houve um aumento da capacidade de armazenar energia dos compósitos sem alteração no seu comportamento eletromagnético de forma macroscópica.

Palavras-chave: Materiais absorvedores de radiação eletromagnética. Banda X. Banda Ku. Compósitos porosos.

Abstract

The development of materials with good capacity to absorb electromagnetic radiation is very important for the civil, military and aerospace sectors, due to the large amount of radiation to which some devices are exposed. Composites based on magnetic and electrical additives dispersed in dielectric polymer matrices that, in addition to reducing radiation energy, have low weight and good processability. These materials are called electromagnetic radiation absorbing materials (MAREs) and can be made from carbon, ferrite, carbon black, graphene oxide, carbon fibers and polymer, joined to some magnetic and dielectric filter. The present work aims to develop porous composites, based on magnetic additives, dispersed in a white silicone matrix. Samples with ferrocobonyl (FC) particulates were produced with their proportion being varied, using percentages of 50, 60 and 70% in relation to the mass quantity of white silicone. All samples were cured using a vacuum pump, with the aim of producing pores, under certain pressures: -50, -150, -250, -350 and -450 mmHg, and samples were also made without pores, for the purpose of comparison. The dimensions of the samples were based on measurements of the offsets used in this work for electromagnetic characterization, the size of the X band samples was 10.2 x 22.9 mm with a thickness of 2 mm, and the Ku band samples were produced with dimensions 15.8 mm x 7.9mm and a thickness of 6.5mm. The electromagnetic characterization was carried out using a Vector Network Analyzer (VNA) and WR90 rectangular waveguide, and the frequency ranges analyzed were (8.2 - 12.4 GHz), referring to the X band, as an application example, there are satellites with Synthetic Aperture Radar (SAR), for Earth observation such as meteorology, agriculture, intelligence and security. And, the frequency range of (12.4 - 18 GHz) referring to the Ku band, which is used in the telecommunications and military radar sectors, was also analyzed. The results obtained from the reflectivity test showed high values (>90%) of electromagnetic radiation absorption and there was an increase in the energy storage capacity of the composites without changing their macroscopic electromagnetic behavior.

Keywords: Electromagnetic radiation absorbing materials. X Band. Ku Band. Porous composites.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 - Representação da estrutura da ferropentacarbonila.	3
Figura 02 - Processo de purificação da Ferro-pentacarbonila	4
Figura 03 - Estrutura cúbica de corpo centrado referente à estrutura da ferrocronila.	4
Figura 04 - Representação esquemática dos sinais referentes ao parâmetro S dentro de um guia de onda.....	7
Figura 05 - (a) Configuração do ensaio de refletividade, (b) Representação do ensaio de RL.	8
Figura 06 - Silicone (a), Ferrocronila (b).....	10
Figura 07 - Balança Analítica.	11
Figura 08 - Etapas do processamento das amostras.	12
Figura 09 - Sistema de aplicação de vácuo.....	13
Figura 10 - Componentes do sistema de caracterização eletromagnética.	14
Figura 11 - Foto das amostras, (a) 50% de FC, (b) 60% de FC e (c) 70% de FC.	16
Figura 12 - Permissividade real das composições de 50% (a), 60% (b) e 70% (c) dos compósitos porosos de FC na banda X.....	17
Figura 13 - Permissividade imaginária das composições de 50% (a), 60% (b) e 70% (c) dos compósitos porosos de FC na banda X.....	18
Figura 14 - Permeabilidade real das composições de 50% (a), 60% (b) e 70% (c) dos compósitos porosos de FC na banda X.....	19
Figura 15 - Permeabilidade imaginária das composições de 50% (a), 60% (b) e 70% (c) dos compósitos porosos de FC na banda X.....	20
Figura 16 - Figura 16 - Permissividade real das composições de 50% (a), 60% (b) e 70% (c) dos compósitos porosos de FC na banda Ku.	21
Figura 17 - Permissividade imaginária das composições de 50% (a), 60% (b) e 70% (c) dos compósitos porosos de FC na banda Ku.....	22
Figura 18 - Permeabilidade real das composições de 50% (a), 60% (b) e 70% (c) dos compósitos porosos de FC na banda Ku.....	23
Figura 19 - Permeabilidade imaginária das composições de 50% (a), 60% (b) e 70% (c) dos compósitos porosos de FC na banda Ku.....	24
Figura 20 - Tangente de Perda elétrica das composições de 50% (a), 60% (b) e 70% (c) dos compósitos porosos de FC na banda X.....	25
Figura 21 - Tangente de Perda magnética das composições de 50% (a), 60% (b) e 70% (c) dos compósitos porosos de FC na banda X.	26
Figura 22 - Tangente de Perda elétrica das composições de 50% (a), 60% (b) e 70% (c) dos compósitos porosos de FC na banda Ku.....	27
Figura 23 - Tangente de Perda magnética das composições de 50% (a), 60% (b) e 70% (c) dos compósitos porosos de FC na banda Ku.	28
Figura 24 - Absorção (a), reflexão (b) e transmissão (c) na variação de 50% de FC na banda X.	29
Figura 25 - Absorção (a), reflexão (b) e transmissão (c) na variação de 60% de FC na banda X.	30
Figura 26 - Absorção (a), reflexão (b) e transmissão (c) na variação de 70% de FC na banda X.	31

Figura 27 - Absorção (a), reflexão (b) e transmissão (c) na variação de 50% de FC na banda Ku.	32
Figura 28 - Absorção (a), reflexão (b) e transmissão (c) na variação de 60% de FC na banda Ku.	33
Figura 29 - Absorção (a), reflexão (b) e transmissão (c) na variação de 70% de FC na banda Ku.	34
Figura 30 - Comportamento das amostras com poros e sem poros no ensaio de refletividade.	35
Figura 31 - Refletividade das amostras com concentrações de FC de 50% (a), 60% (b) e 70% (c) para a banda X.	36
Figura 32 - Refletividade das amostras com concentrações de FC de 50% (a), 60% (b) e 70% (c) para a banda Ku.	37
Figura 33 - Resultado da simulação do potencial de atenuação.	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 01- Relação entre refletividade e a porcentagem da energia absorvida.....	8
Tabela 02 - Variação da porcentagem em massa e volume de ferrocarbonila.	11
Tabela 03 - Variação da pressão do vácuo.	13
Tabela 04 - Relação entre amostras e pressão.	15

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

IEM	Interferência Eletromagnética
MARE	Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética
NRW	Modelo matemático Nicholson Ross Weir
FC	Ferrocarbonila
VNA	Vector Network Analyzer – Analizador de Redes Vetorial

LISTA DE SÍMBOLOS

μ	Permeabilidade magnética complexa
μ'	Parcela capacitiva da permeabilidade magnética
μ''	Parcela dissipativa da permeabilidade magnética
ε	Permissividade elétrica complexa
ε'	Parcela capacitiva da permissividade elétrica
ε''	Parcela dissipativa da permissividade elétrica
S_{ij}	Parâmetro S
η_{in}	Impedância Intrínseca
$\tan \delta_\varepsilon$	Tangente de perda elétrica
$\tan \delta_\mu$	Tangente de perda magnética
E_i	Energia incidente
E_r	Energia refletida
t	Espessura
c	Velocidade da luz

SUMÁRIO

Resumo	iii
1. Introdução	1
2. Objetivos.....	2
2.1. Objetivos específicos	2
3. Fundamentação Teórica.....	3
3.1. Materiais utilizados.....	3
3.2. Caracterização eletromagnética	5
3.2.1. Propriedades eletromagnéticas	5
3.2.2. Caracterização do comportamento eletromagnético	6
3.2.3. Ensaio de refletividade	7
4. 4. Materiais e Métodos	10
4.1. Processamento do material compósito.....	10
4.2. Caracterização eletromagnética	14
5. Resultados e discussões	15
5.1. Processamento das amostras	15
5.2. Caracterização eletromagnética	16
5.3. Resultados da caracterização eletromagnética.....	17
5.3.1. Ensaio de Refletividade.....	35
5.4. Resultados das simulações eletromagnéticas.....	38
6. Conclusões.....	39
7. Referências Bibliográficas.....	40

1. Introdução

O rápido avanço das tecnologias para o setor aeronáutico e aeroespacial está fortemente ligado à sua capacidade de transmissão de dados devido às novas gerações de comunicações. O grande número de dispositivos eletrônicos que operam simultaneamente gera níveis de ruídos eletromagnéticos nunca vistos (Yang et al, 2022; Przybyl et al, 2023; Zhang et al, 2022; Shen, 2022).

O ruído eletromagnético em grande escala pode ser definido como poluição eletromagnética, e pode causar mau funcionamento em diversos tipos de sistemas eletrônicos. A fim de reduzir este fenômeno, é possível encontrar na literatura vários estudos sobre o desenvolvimento de materiais absorvedores de radiações eletromagnéticas (MARE) (Meng et al, 2009), estes materiais são utilizados como mecanismo de proteção contra a poluição e podem ser constituídos, por exemplo, a base de carbono, ferrita, negro de fumo, óxido de grafeno, fibras de carbono e polímero, unidos a algum filtro magnético e dielétrico.

Neste estudo, o particulado utilizado para a produção dos compósitos foi a ferrocarbonila, por conta de seu baixo custo e boa capacidade de absorção eletromagnética. Entre os materiais utilizados como MARE, é possível destacar materiais com determinados índices de porosidade, com a justificativa de que a região dos poros contribui para otimizar potencial de atenuação (Zhang et al, 2022; Shen, 2022; Deng et al, 2022; Medeiros et al, 2022; Zhang et al, 2022; Shi et al, 2023).

O presente trabalho tem como objetivo desenvolver um estudo sobre a influência de índices de porosidades em níveis controlados no efeito da capacidade de atenuação na produção de um MARE. Para isto, foi induzida uma porosidade nos compósitos magnéticos produzidos com uma matriz dielétrica de silicone, e dopantes magnéticos de ferrocarbonila (FC), foram produzidas, nas escalas de 50%, 60% e 70% em peso relacionado à quantidade total de silicone. A matriz do compósito foi feita a partir do silicone pelo seu baixo peso e facilidade de manuseio ao fabricar as amostras. Os níveis de poros foram controlados através de uma bomba de vácuo no processo de cura do silicone, com 5 variações no nível de pressão durante a cura, o que leva a 5 níveis de poros diferentes. Os níveis de pressão aplicadas neste trabalho foram de: -50mmHg, -150mmHg, -250mmHg, -350mmHg, e -450mmHg. E, foram produzidas amostras sem a indução de poros, para caracterização dos materiais sem poros em comparação com os efeitos dos poros. Os resultados obtidos neste trabalho foram aplicados para as faixas de frequência da banda X (8,2 – 12,4 GHz) e Ku (12,4 – 18 GHz), que são utilizadas em setores de telecomunicações, dispositivos de satélites (como o radar SAR) e radares militares. Para a caracterização deste material foram analisadas as propriedades de permissividade elétrica e permeabilidade magnética a partir do modelo matemático NRW. O método da refletividade foi utilizado para caracterizar os materiais compósitos e identificar a faixa de frequência com o maior potencial de absorção.

2. Objetivos

O objetivo deste trabalho é desenvolver compósitos porosos capazes de desempenhar alta capacidade de atenuação de determinadas radiações eletromagnéticas utilizadas no setor aeroespacial (Banda X e Ku) e contribuir para o desenvolvimento desta tecnologia no Brasil.

2.1. Objetivos específicos

Caracterizar a relação de aditivos magnéticos em compósitos porosos a fim de obter o melhor desempenho em relação à absorção de radiações com frequência na Banda X (8,2 - 12,4 GHz) e na Banda Ku (12,4 – 18 GHz).

Determinar as melhores condições de processamento a fim de se obter um compósito homogêneo e com aceitável desempenho eletromagnético.

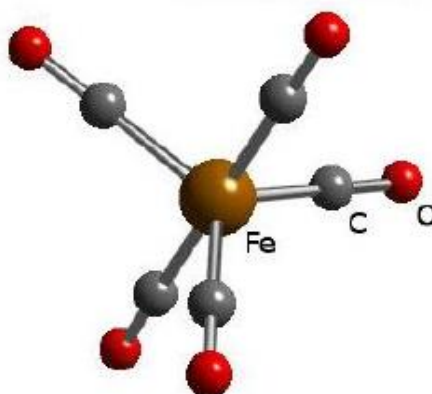
3. Fundamentação Teórica

Neste trabalho, de maneira geral, foram utilizados dois materiais para a análise: a ferrocarbonila e a borracha de silicone para fabricação do compósito.

3.1. Materiais utilizados

A ferrocarbonila (FC) é obtida através da decomposição térmica da ferropentacarbonila, com uma estrutura semelhante à Figura 01. A FC é um material que apresenta o ferro em grande parte da sua composição total (aproximadamente 96% em peso). Com isso, possui propriedades magnéticas e é muito utilizada no setor industrial como parte dos componentes de dispositivos eletrônicos (Rodrigues, 2010).

Figura 01 - Representação da estrutura da ferropentacarbonila.



Fonte: Lopes, 2020.

A ferrocarbonila vem ganhando atenção nas aplicações eletrônicas MARE em núcleos de bobina de alta frequência. A FC é obtida pela decomposição da ferro-pentacarbonila com estrutura demonstrada decomposição da ferro-pentacarbonila. A ferro-pentacarbonila é um composto a base de um átomo de ferro ligado a cinco grupos carbonilas. O ferro, que constitui aproximadamente 96% da massa deste material, é responsável pela origem dos momentos magnéticos da ferrocarbonila. A ferrocarbonila pode ter caráter magnético mole ou duro dependendo de seu processo de síntese. Neste trabalho foi utilizada a ferrocarbonila mole, que é obtida através de uma atmosfera de hidrogênio com presença de N, C e O. Estes átomos reduzem a resistência mecânica e consequentemente aumentam a permeabilidade e a capacidade de magnetização do material (Liu et al, 2010). O processo da síntese da ferrocarbonila utilizada pode ser visto na Figura 02.

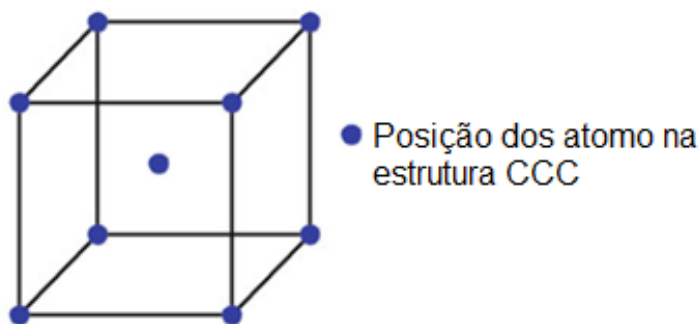
Figura 02 - Processo de purificação da Ferro-pentacarbonila



Fonte: Lopes, 2019.

A ferrocarbonila é composta basicamente pelo ferro na estrutura Ferro- α e algumas regiões dielétricas de Fe_xN e Fe_xC (Liu et al, 2010). Desta forma, a estrutura cristalina da ferrocarbonila é majoritariamente composta pela estrutura cúbica de corpo centrado demonstrado na Figura 03

Figura 03 - Estrutura cúbica de corpo centrado referente à estrutura da ferrocarbonila.



Fonte: Carter e Norton (2013).

A Borracha de silicone foi descoberta no início do século XX, e é um material derivado da união de cloreto de metila e areia de silício, dando origem a uma cadeia polimérica heterogênea com átomos de silício (Si) e oxigênio (O) intercalados. Esta estrutura possui grupos laterais metil ligados ao Silício que proporcionam a estabilidade da cadeia e com isso o silicone mostra grande resistência química. Este tipo de material é considerado um semi-orgânico e não é derivado essencialmente do petróleo. Em relação ao seu comportamento termomecânico, este é definido por meio de um elastômero com resistência a tração entre 10 a 100 psi, e que dependendo de seu dopante pode apresentar estabilidade térmica estrutural

entre -40°C e 200°C. Este material também possui alto módulo de elasticidade podendo alcançar 300% a 400% de alongamento (Kashi et al., 2018), (Canevarolo JR, 2006).

A borracha de silicone possui um nível aceitável de processabilidade devido a sua ótima conformidade em seu processo de cura e pode ser utilizado como material de recobrimento em peças de grande complexidade. A sua característica elastomérica com poucas ligações cruzadas permite que seja aplicada como redutor de vibrações mecânicas em projetos estruturais. A sua cadeia polimérica demonstra caráter covalente (Si-O), este fator é importante, em aplicações, como material isolante para sistemas de transmissão, peças no setor automobilístico, sistemas de armazenamento de alimentos, implantes no setor da medicina, entre outras mais (Canevarolo JR, 2006).

3.2. Caracterização eletromagnética

Para a caracterização eletromagnética foram calculadas a permissividade elétrica e a permeabilidade magnética, partes real e imaginária, e tangentes de perda elétrica e magnética. O potencial de atenuação dos materiais desenvolvidos neste trabalho foram analisados através do ensaio de refletividade, em paralelo foram calculados a absorbância (A), a transmitância (T) e a reflectância (R) do MARE através da medida do Parâmetro-S, para estudo do impacto do comportamento eletromagnético deste compósito em relação à porosidade.

3.2.1. Propriedades eletromagnéticas

Os parâmetros de espalhamento, definidos como Parâmetro-S, foram utilizados para calcular a permeabilidade magnética complexa e a permissividade elétrica complexa. As medições foram feitas com o método proposto por Nicholson-Ross-Weir (NRW) que também é conhecido como método de transmissão e reflexão para materiais homogêneos e isotrópicos (Medeiros et al, 2022).

Neste trabalho as faixas de frequência escolhidas para o estudo foram as bandas X (8,2 - 12,4 GHz) e Ku (12,4 – 18 GHz). A permissividade elétrica (ϵ) e a permeabilidade magnética (μ) são definidas como propriedades de um determinado meio material. Estas propriedades são definidas de acordo com o comportamento macroscópico interno quando submetido a um campo elétrico, magnético ou eletromagnético. A distorção interna de um material devido à excitação gerada pelo campo aplicado causa uma variação na distribuição nas polarizações eletrônicas no interior do material. Esta distorção tem relação direta com a capacidade de absorção de energia da radiação incidente por parte do mesmo. Desta forma, é de grande importância a caracterização destas propriedades a fim de estudar e analisar como melhorar o potencial de absorção de um material compósito variando sua composição interna (Zhang et al, 2022).

As propriedades de permissividade elétrica complexa e permeabilidade magnéticas complexa podem ser descritas de acordo com as fórmulas 1 e 2, onde a parte real (ε' , μ') referem-se aos fenômenos capacitivos e a parte imaginária (ε'' , μ'') aos fenômenos dissipativos do material (Lopes, 2020).

$$\varepsilon = \varepsilon' - j \varepsilon'' \quad (1)$$

$$\mu = \mu' - j \mu'' \quad (2)$$

A análise de perda energia de uma determinada onda pode ser relacionada aos fenômenos internos do meio material e são importantes para a absorção de microondas. Para estudo da relação entre os fenômenos capacitivos e dissipativos no interior do meio, é recorrente a utilização do fator tangente de perda elétrica ($\tan \delta_\varepsilon$), e tangente de perda magnética ($\tan \delta_\mu$), conforme descritos nas equações 3 e 4. As tangentes de perdas representam a relação entre a proporção de energia dissipada pela proporção armazenada por um determinado material, desta forma o valor de referência para tal análise é o valor tangente igual a 1 (Orfanidis, 2008). Para este valor, é descrito que a parcela capacitiva e a dissipativa são iguais e o material é dito ideal. Para o potencial de absorção, a tangente de perda indica quais dos fenômenos, capacitivos ou dissipativos, estão predominando no fenômeno de perda de energia (Gama & Rezende, 2010; Lopes, 2020). As perdas dielétricas na faixa de microondas envolvem os mecanismos de relaxamento da polarização e condutância (Gama & Rezende, 2010)

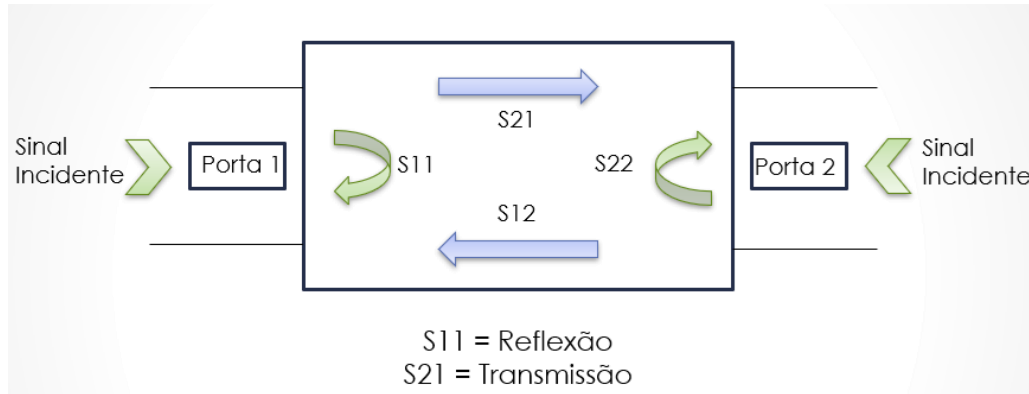
$$\tan \delta_\varepsilon = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (3)$$

$$\tan \delta_\mu = \frac{\mu''}{\mu'} \quad (4)$$

3.2.2. Caracterização do comportamento eletromagnético

A Figura 04 apresenta os sinais de transmissão e reflexão gerados no interior de um guia de onda retangular. O Parâmetro-S (S_{ij}) é definido como parâmetro de espalhamento da onda eletromagnética emitida em uma amostra. A onda eletromagnética ao interagir com o material irá gerar 2 sinais de resposta devido aos fenômenos de reflexão e transmissão (Pinho et al, 1999). 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 (Karimi et al., 2016). Da mesma forma, o sinal emitido pela porta 2 também é analisado devido aos fenômenos de reflexão $|S_{22}|^2$ e transmissão $|S_{12}|^2$.

Figura 04 - Representação esquemática dos sinais referentes ao parâmetro S dentro de um guia de onda.



Fonte: Produção do autor, 2024.

A energia refletida, transmitida e absorvida pode ser descrita conforme as equações 5, 6, 7 para quantificar a refletância (R) transmitância (T) e absorbância (A) de um determinado material. Além desses parâmetros, é importante analisar a energia devido à absorção efetiva (A_{eff}) que representa o quanto de energia o material absorveu de forma efetiva da onda eletromagnética (M. Mishra et al., 2013), que pode ser expressa na equação 8.

$$R = |S_{11}|^2 \quad (5)$$

$$T = |S_{21}|^2 \quad (6)$$

$$A = 1 - R - T \quad (7)$$

$$A_{eff} = \frac{A}{1 - R} \quad (8)$$

3.2.3. Ensaio de refletividade

O ensaio da refletividade é realizado de forma semelhante ao método NRW, no entanto, neste ensaio coloca-se uma placa metálica atrás da amostra que está sendo analisada, impedindo que ocorra o fenômeno de transmissão da radiação. Desta forma, o sinal da onda passa pelo material analisado e entra em contato com a placa metálica sendo refletido. Assim, a partir deste ensaio é possível calcular a capacidade de atenuação magnética que o composto possui. A

Figura 05 demonstra uma representação do ensaio de refletividade, também conhecido no inglês como Reflection Loss (RL).

Figura 05 - (a) Configuração do ensaio de refletividade, (b) Representação do ensaio de RL.



Fonte: Produção do autor, 2024.

Para se obter um valor referente a refletividade do material é necessário calcular a proporção da energia incidente no material (E_i) e da energia refletida pelo material (E_r). Este cálculo pode ser expresso matematicamente de acordo com a equação 9 (da Silva et al., 2009). A relação entre a atenuação da radiação e a porcentagem de energia absorvida conforme a equação 9, é apresentada na Tabela 01.

$$RL(dB) = 10 \log_{10} \left(\frac{E_r}{E_i} \right) \quad (9)$$

Tabela 01- Relação entre refletividade e a porcentagem da energia absorvida.

Atenuação (dB)	% energia absorvida
0	0
-3	50
-10	90
-20	99
-30	99,9
-40	99,99

Fonte: Produção do autor, 2024.

Segundo descrito na literatura (Klygach et al, 2019), o comportamento de refletividade (RL) da radiação eletromagnética também pode ser definida em relação à impedância intrínseca do material, conforme descrito pelas equações 10 e 11.

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

$$\eta_{in} = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \tanh \left(\frac{2\pi f}{c} t \sqrt{\mu \varepsilon} \right) \quad (11)$$

Onde η_{in} , t , f , c , μ , ε são respectivamente a impedância do material, espessura, frequência, velocidade da luz, permeabilidade complexa relativa e permissividade complexa relativa. De acordo com as fórmulas 10 e 11, é possível relacionar a RL com os parâmetros como a espessura t e as propriedades de permeabilidade μ e permissividade do material ε (Liu et al., 2010; Shu et al., 2018). A curva de RL apresenta altos valores negativos quando o argumento da função logarítmica na equação 10 se aproxima do valor zero, então para tornar este valor o menor possível é necessário fazer que η_{in} se aproxime de 1. Este fato pode ser controlado com o ajuste dos parâmetros μ , ε e t na definição de impedância na equação 11. E com isso, é possível aumentar o potencial de absorção e obter uma melhor eficiência na proteção de dispositivos eletrônicos (Pinho, M. S. et al, 1999).

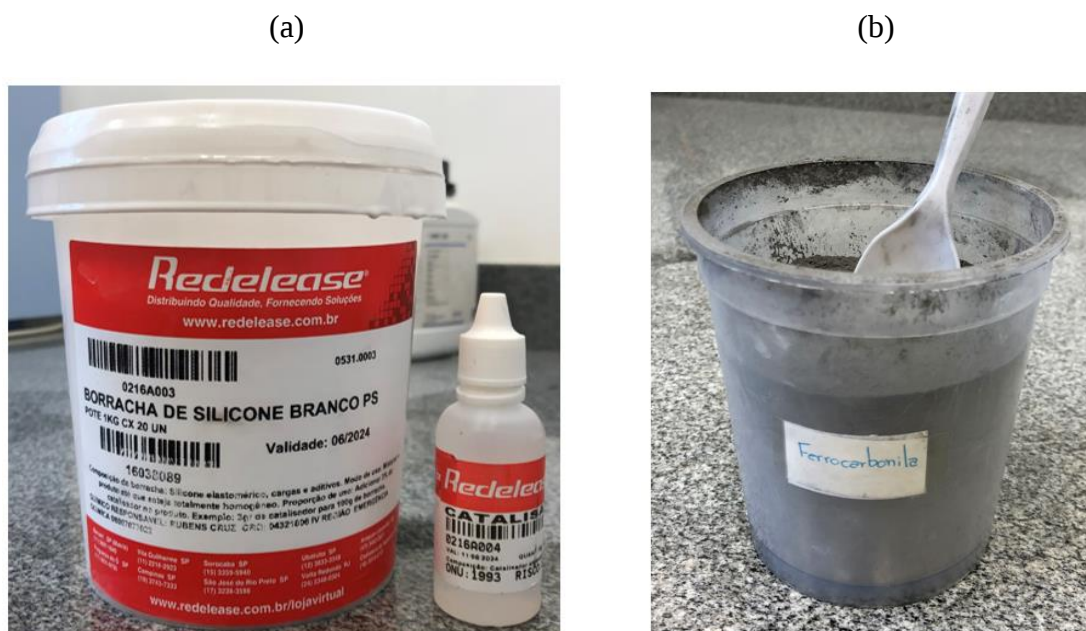
4. 4. Materiais e Métodos

Para composição das amostras foi utilizada a borracha de silicone branco, sendo a matriz, e como particulado magnético, a ferrocarbonila. As amostras foram fabricadas manualmente e colocadas em seus respectivos moldes para o tamanho dos offsets das bandas X e Ku. E, por fim, a cura dos compósitos foi realizada na bomba de vácuo para a análise do comportamento das amostras nas pressões: -50, -150, -250, -350 e -450 mmHg.

4.1. Processamento do material compósito

As amostras foram produzidas a partir do particulado de ferrocarbonila com massa específica de $7,65 \text{ g/cm}^3$, disponibilizado comercialmente pela empresa BASF® e para compor a matriz dielétrica foi utilizada a borracha de silicone da empresa Redelease®. O agente de cura foi utilizado na proporção de 5% em massa em relação a quantidade de massa do silicone, e a cura das amostras foi realizada em temperatura ambiente. Sendo indicada na Figura 06 (a), a borracha de silicone utilizada, e na Figura 06 (b) a FC utilizada neste trabalho.

Figura 06 - Silicone (a), Ferrocarbonila (b).



Fonte: Produção do autor, 2024.

Tabela 02 - Variação da porcentagem em massa e volume de ferrocarbonila.

% Massa do Material Magnético	% Volume (Ferrocarbonila)
50	14,3
60	20,0
70	28

Fonte: Produção do autor, 2024.

No trabalho foram desenvolvidas 5 amostras submetidas à vácuo nas pressões expressas na Tabela 03, com suas devidas concentrações do particulado na Tabela 02, para comparação, foi variado o particulado magnético para análise de desempenho. A quantidade de materiais foi medida na balança analítica AAKER® (Figura 07). As amostras da banda X foram produzidas nas dimensões do guia de onda retangular acoplado a um Analisador de Rede Vetorial apresentado na Figura 10, de 22,9 mm x 10,2 mm e espessura de 9.77 mm. As amostras da banda Ku foram produzidas com as dimensões de 15.8mm x 7.9mm e espessura 6.5mm.

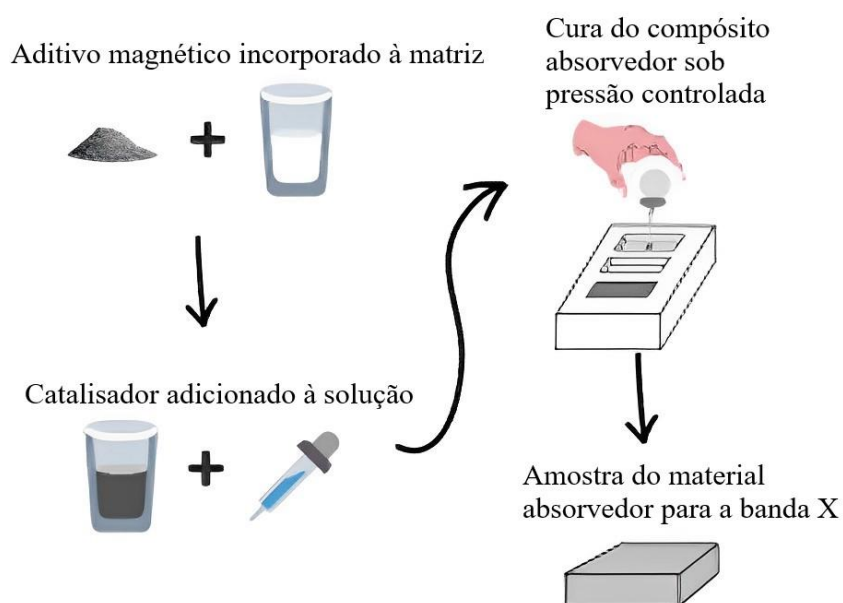
Figura 07 - Balança Analítica.



Fonte: Produção do autor, 2024.

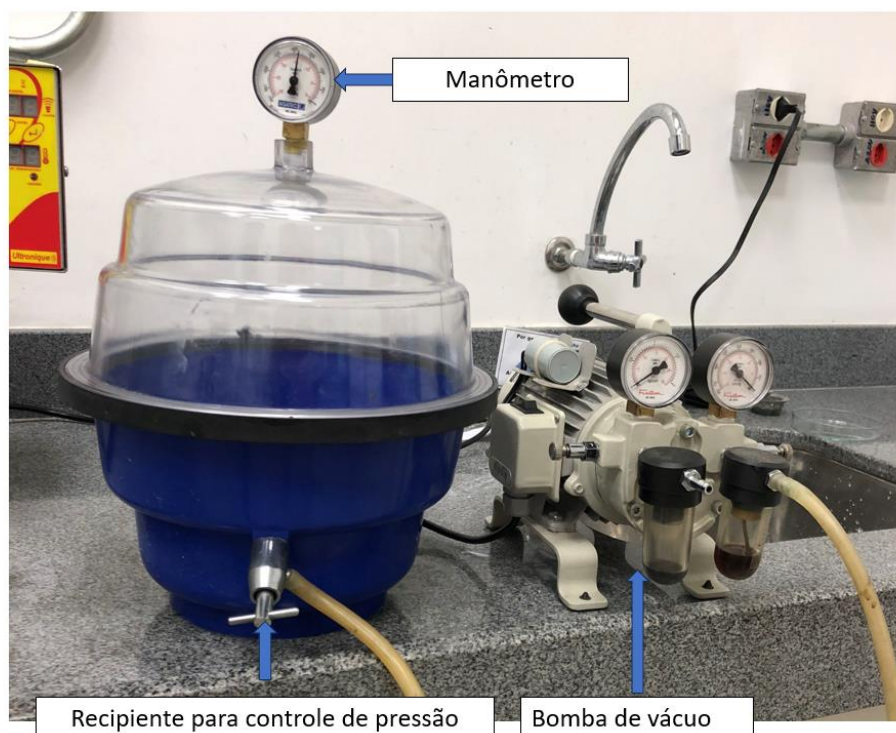
O processo de síntese do compósito está apresentado na Figura 08. Para se desenvolver uma amostra, após os materiais serem pesados na balança analítica nas proporções desejadas, se coloca num recipiente a FC e o silicone branco. Em seguida se realiza uma mistura manual até esta ficar homogênea, após isso o agente de cura é usado na proporção de 5% em massa em relação à quantidade de massa do silicone. Feito isso, foi colocado a mistura do compósito no molde de cada banda desejada (X e Ku), na bomba de vácuo (Figura 09) para o processo de cura acontecer conforme as pressões desejadas deste estudo expressas na Tabela 03 e em temperatura ambiente.

Figura 08 - Etapas do processamento das amostras.



Fonte: adaptado de LOPES, 2020.

Figura 09 - Sistema de aplicação de vácuo.



Fonte: Produção do autor, 2024.

Tabela 03 - Variação da pressão do vácuo.

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

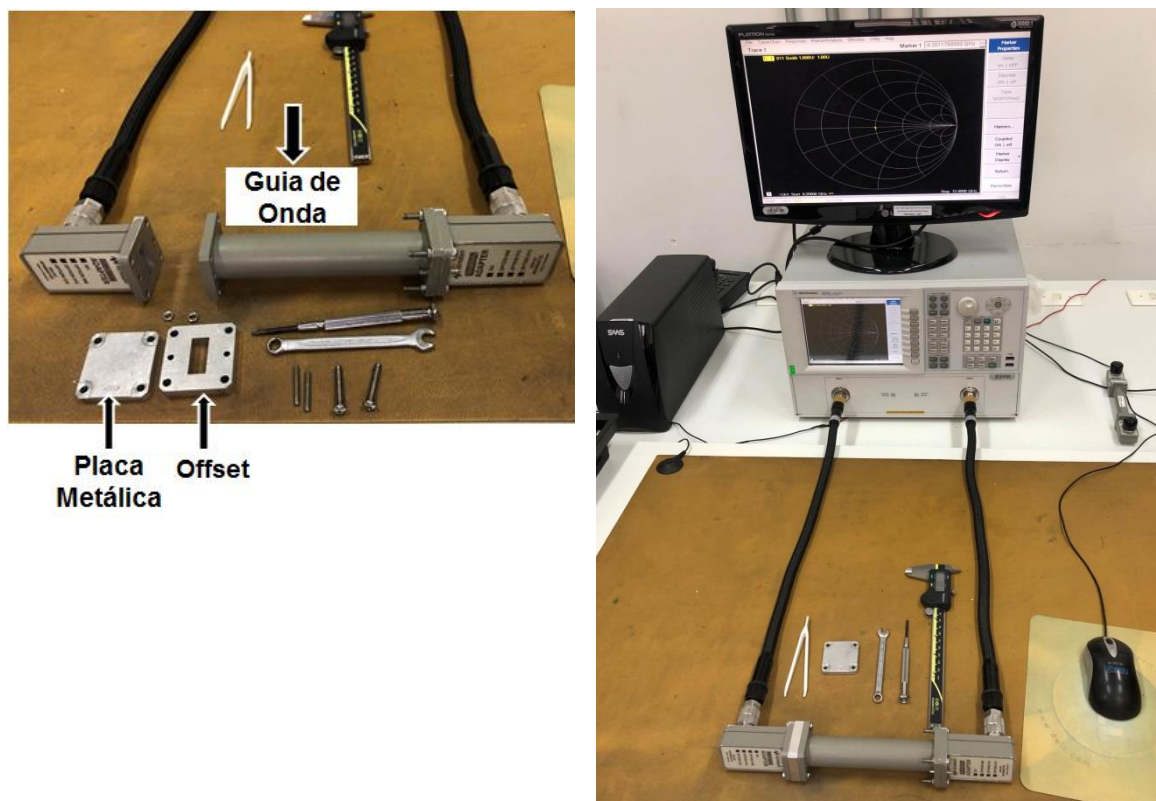
Fonte: Produção do autor, 2024.

Para o controle da porosidade, os materiais compósitos são colocados no recipiente de controle de pressão apresentado na Figura 09, e coloca-se a pressão desejada para o experimento, olhando o manômetro. E assim que atingida a pressão se desliga a bomba de vácuo, deixando curar a amostra para atingir o resultado esperado.

4.2. Caracterização eletromagnética

As propriedades eletromagnéticas de permissividade elétrica e permeabilidade magnética foram caracterizadas através de um Analisador de Redes Vetorial ou conhecido em inglês como, *Vector Network Analyzer* (VNA), modelo N5232A da empresa *Agilent Technologies*®, acoplado a um guia de onda retangular do Kit X11644A para banda X e o Kit P11644A para banda Ku. As faixas de frequência analisadas foram de (8,4 GHz - 12,4 GHz), referente à banda X, e (12,4 - 18 GHz) referente à banda Ku. A Figura 10 apresenta o VNA e os seus componentes como cabos transmissões (porta 1 e porta 2) e os adaptadores acoplados aos cabos. É possível observar também o acessório offset que é utilizado como suporte da amostra e por isso define as dimensões de área mínimas do material a ser analisado, e a placa metálica utilizada no ensaio de refletividade.

Figura 10 - Componentes do sistema de caracterização eletromagnética.



Fonte: Produção do autor, 2024.

5. Resultados e discussões

5.1. Processamento das amostras

O presente trabalho foi realizado para estudo da capacidade de desenvolvimento de amostras de material compósito com a presença de poros induzidos no processo de síntese. Este processo foi realizado através da aplicação de pressão negativa utilizada enquanto ocorria o processo de cura do silicone. A relação entre as amostras e pressão está descrita na Tabela 04.

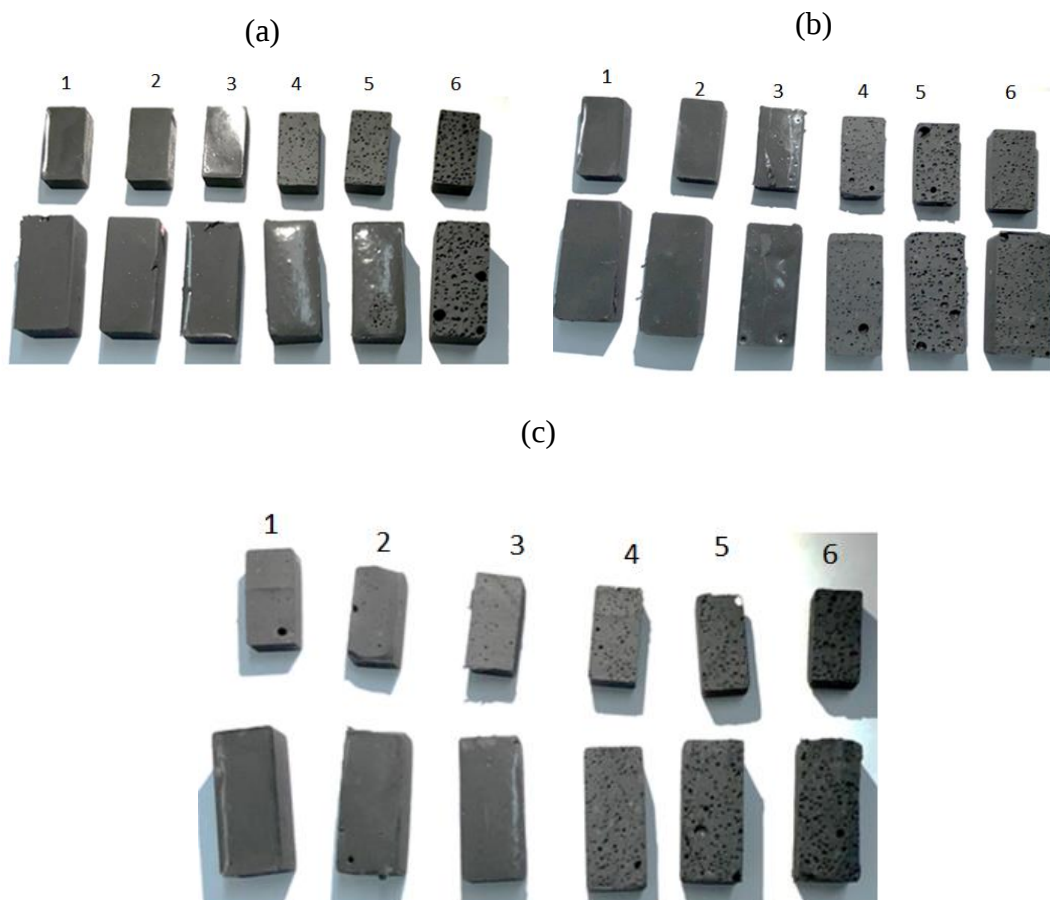
Tabela 04 - Relação entre amostras e pressão.

Amostra	1	2	3	4	5	6
Pressão	0	-50mmHg	-150mmHg	-250mmHg	-350mmHg	-450mmHg

Fonte: Produção do autor, 2024.

As amostras em Figura 11 (a) são compostas de 50% de FC e silicone branco. E a ordem das pressões aplicadas no vácuo é crescente começando à: -50, -150, -250, -350 e -450 mmHg. As amostras em Figura 11 (b) são compostas de 60% de FC e silicone branco e a ordem das pressões aplicadas no vácuo são crescentes começando à: -50, -150, -250, -350 e -450 mmHg. As amostras em Figura 11 (c) são compostas de 70% de FC e silicone branco e a ordem das pressões aplicadas no vácuo são crescentes começando à: -50, -150, -250, -350 e -450 mmHg.

Figura 11 - Foto das amostras, (a) 50% de FC, (b) 60% de FC e (c) 70% de FC.



Fonte: Produção do autor, 2024.

5.2. Caracterização eletromagnética

Foi utilizado um guia de ondas da banda X e da banda Ku, acoplado a um VNA (Vector Network Analyzer), para a caracterização das amostras de compósitos porosos.

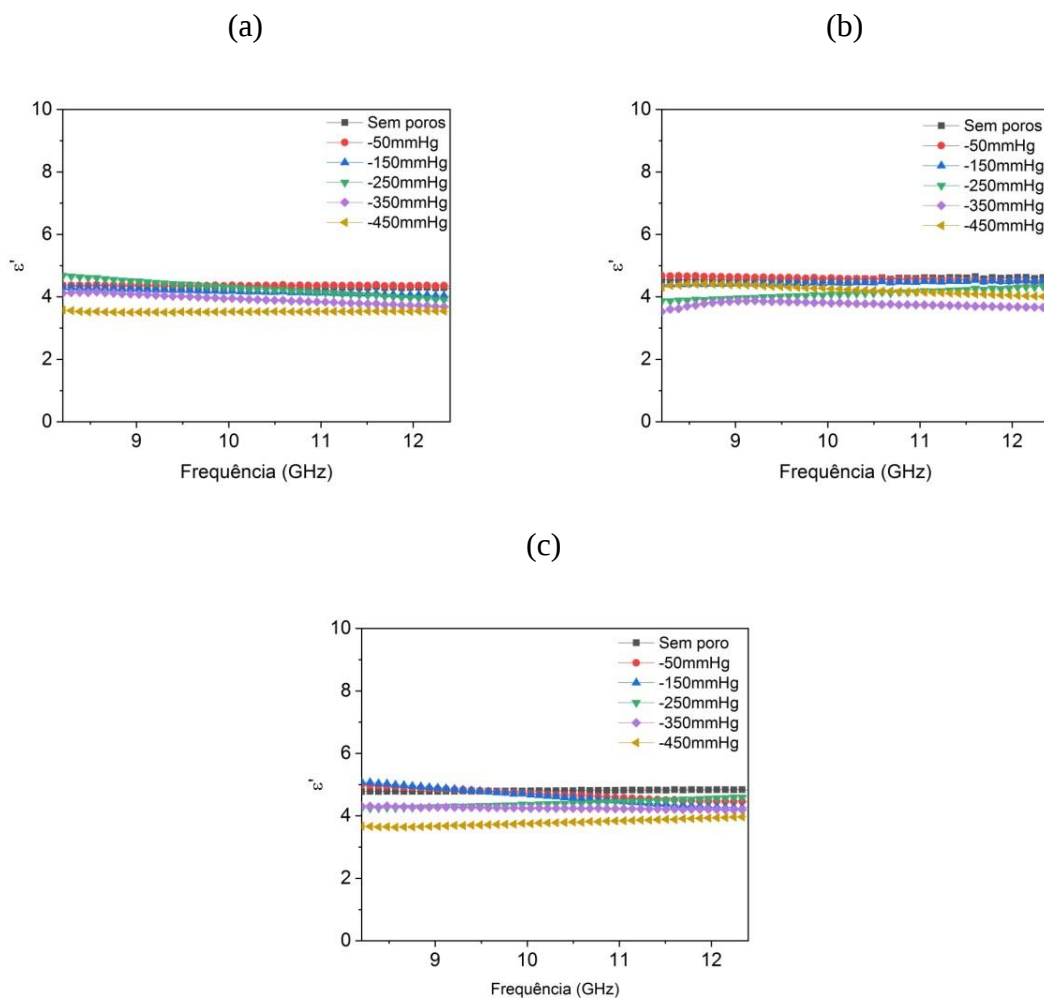
As propriedades de permissividade elétrica e permeabilidade magnética foram obtidas pelo software de caracterização eletromagnética, que usa o método NRW para obter os parâmetros S, que possibilitou também o cálculo dos parâmetros A (Absorbância), R (Reflectância) e T (Transmitância).

O método de refletividade (Reflection Loss) também foi utilizado, para que se pudesse obter em valores de dB, a porcentagem de radiação incidente atenuada pelo material.

5.3. Resultados da caracterização eletromagnética

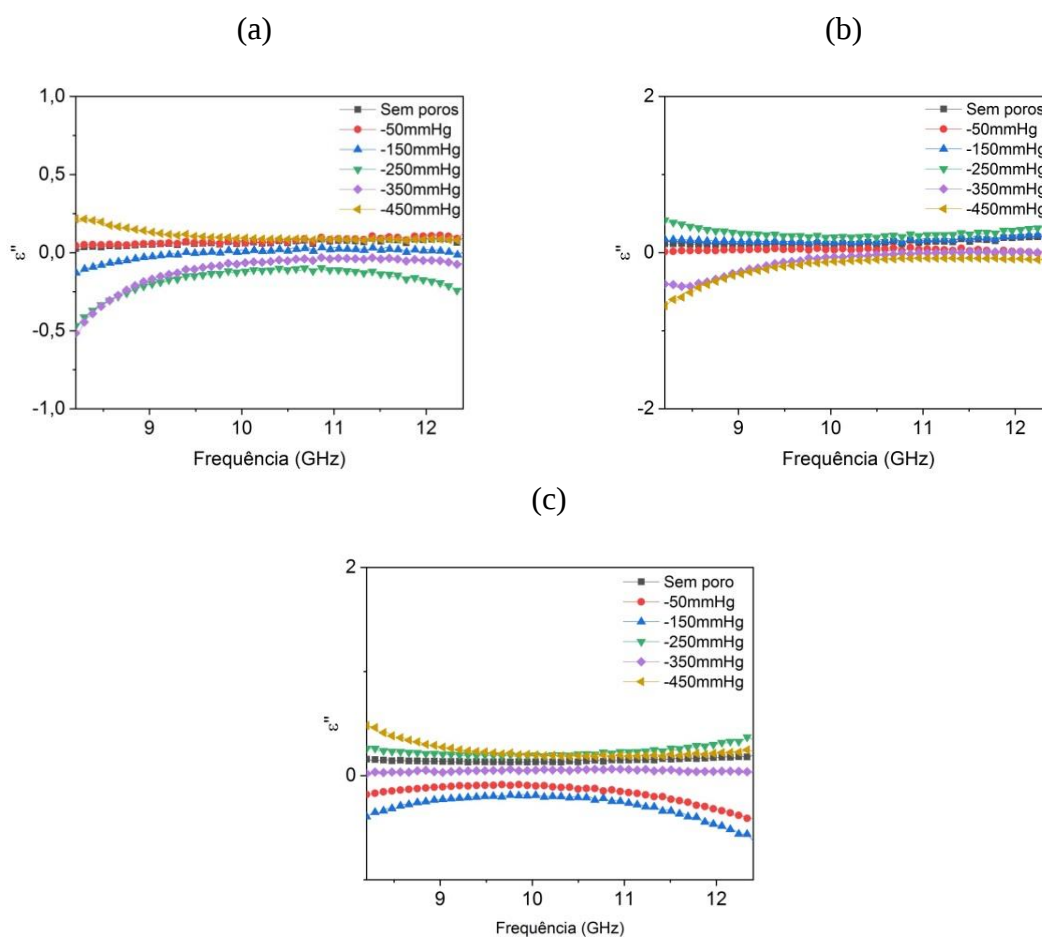
De acordo com os dados da Figura 12, o fenômeno capacitivo elétrico (ϵ') manteve uma constante com as quantidades da composição da amostra, seus valores variaram de 3 a 5, visto que não havia particulados elétricos no compósito. Os resultados da parcela dissipativa elétrica (ϵ'') tiveram variações nas extremidades da banda X de -0,5 a 0,5, possivelmente este resultado vem da ausência de particulados elétricos nas amostras, conforme Figura 13.

Figura 12 - Permissividade real das composições de 50% (a), 60% (b) e 70% (c) dos compósitos porosos de FC na banda X.



Fonte: Produção do autor, 2024.

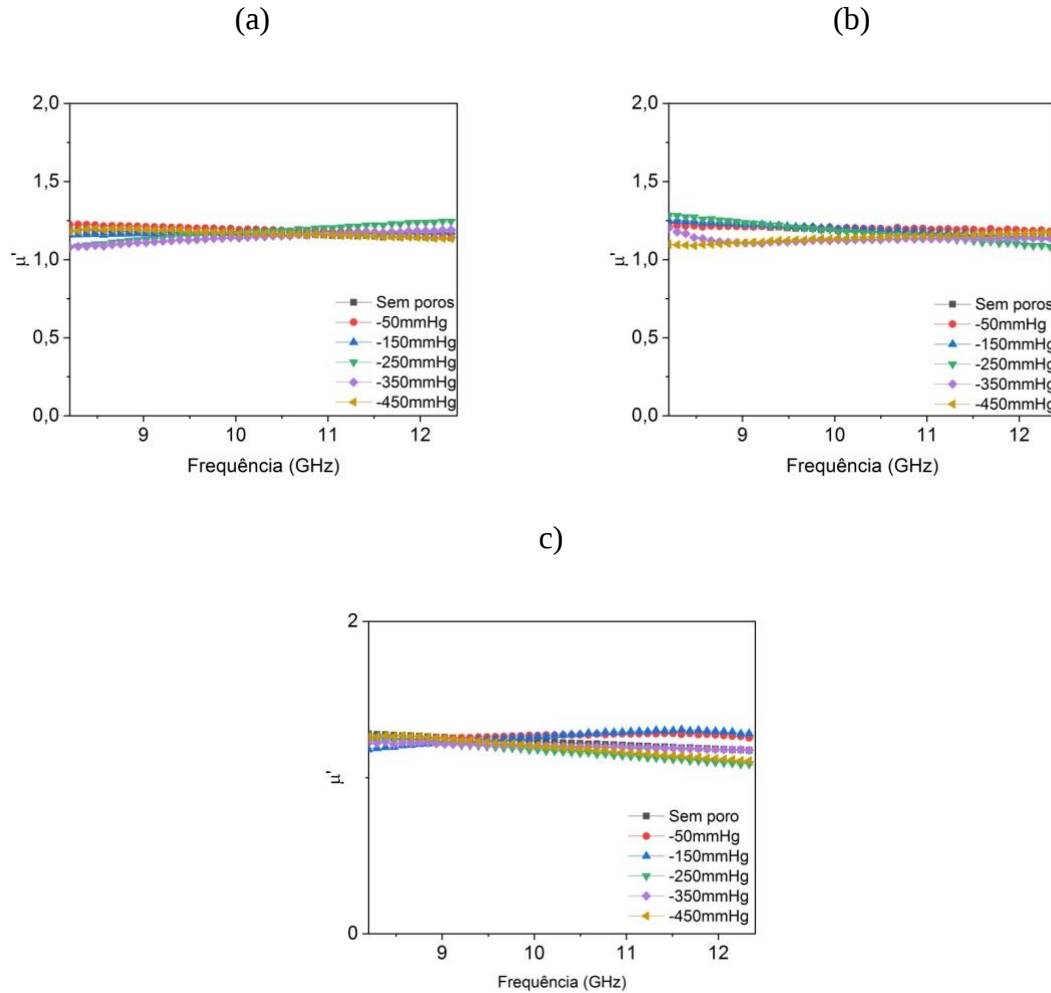
Figura 13 - Permissividade imaginária das composições de 50% (a), 60% (b) e 70% (c) dos compósitos porosos de FC na banda X.



Fonte: Produção do autor, 2024.

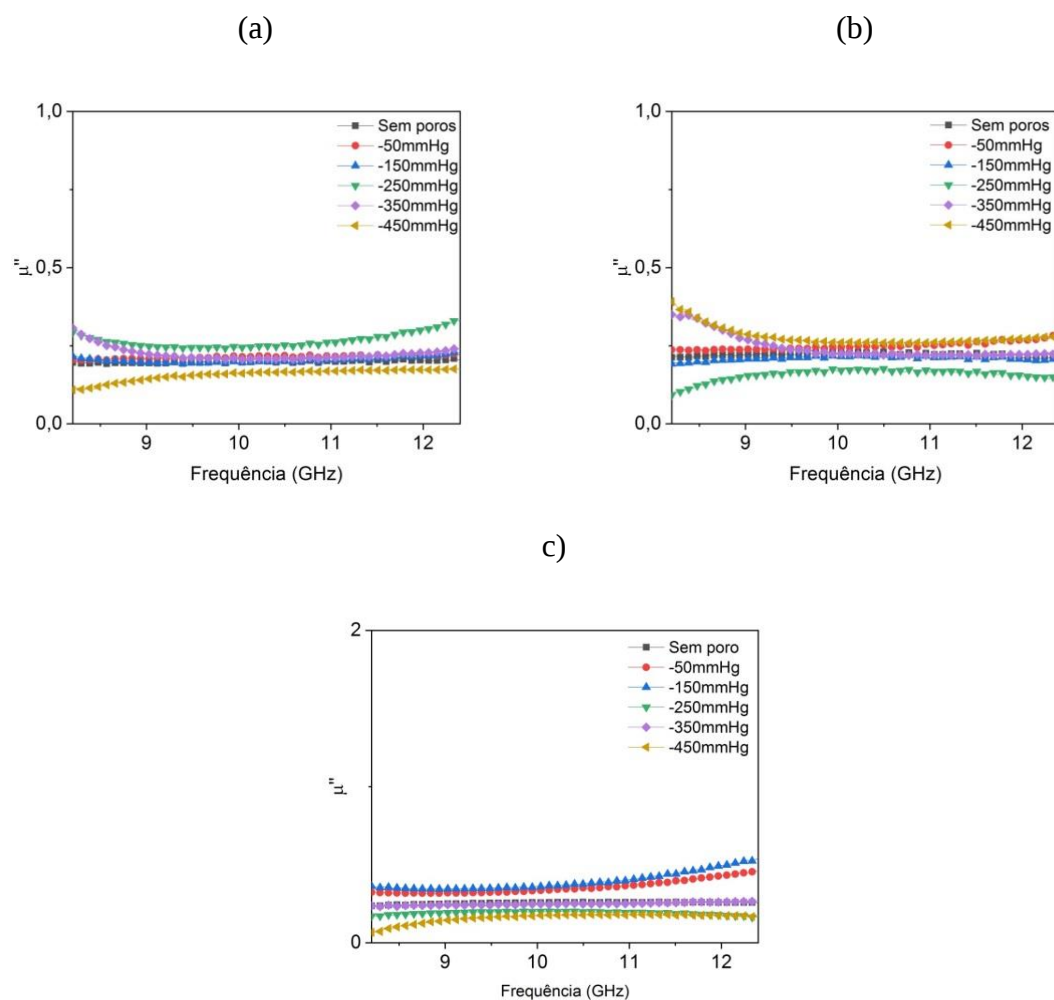
Os valores magnéticos capacitivos (μ') permaneceram próximos a 1, nesta faixa de frequência, Figura 14. Tal fato pode ter acontecido pela influência dos poros que dificulta a trajetória das ondas eletromagnéticas, o que é ilustrado na Figura 30. As parcelas magnéticas dissipativas (μ'') mantiveram a média de 0,35, demonstrando menor dissipação da energia da onda, conforme Figura 15.

Figura 14 - Permeabilidade real das composições de 50% (a), 60% (b) e 70% (c) dos compósitos porosos de FC na banda X.



Fonte: Produção do autor, 2024.

Figura 15 - Permeabilidade imaginária das composições de 50% (a), 60% (b) e 70% (c) dos compósitos porosos de FC na banda X.

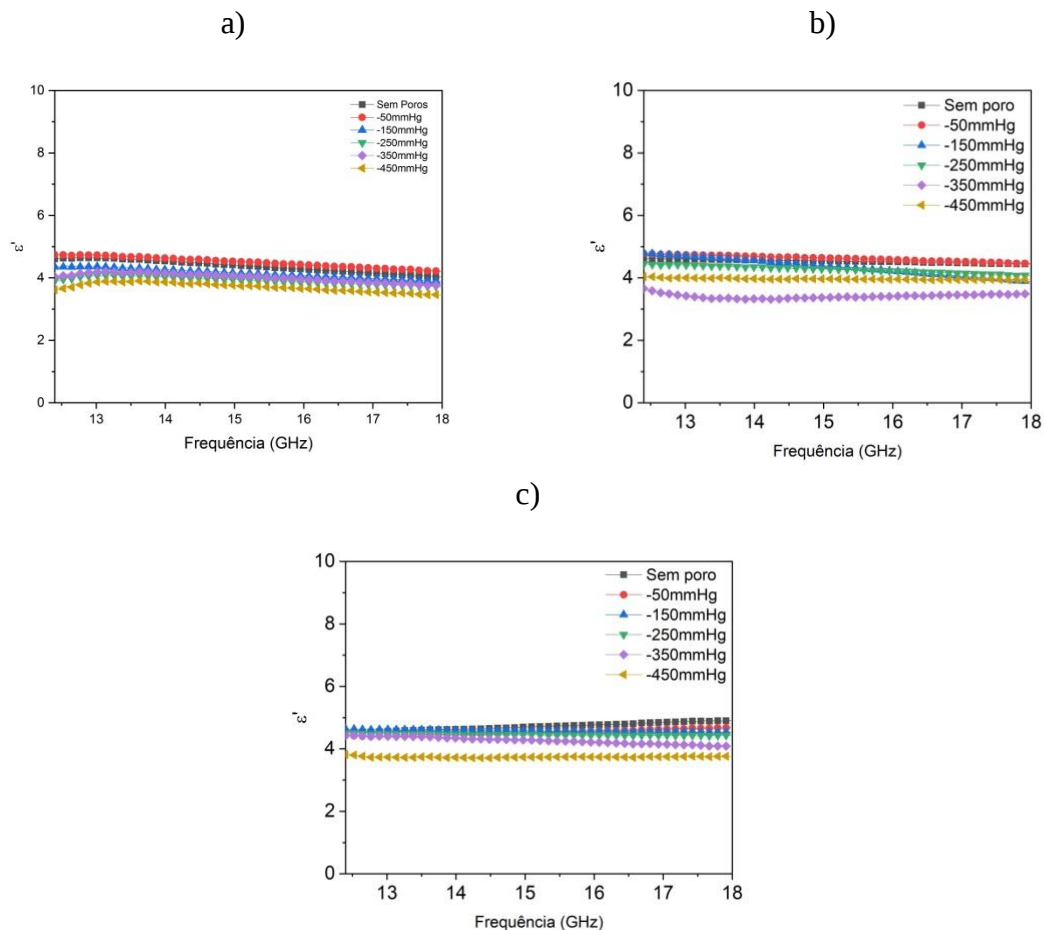


Fonte: Produção do autor, 2024.

De acordo com a Figura 16, a parcela capacitiva elétrica para a banda Ku obteve resultados semelhantes aos da banda X, não houve variação e manteve-se o valor 4 para grande parte da faixa de frequência.

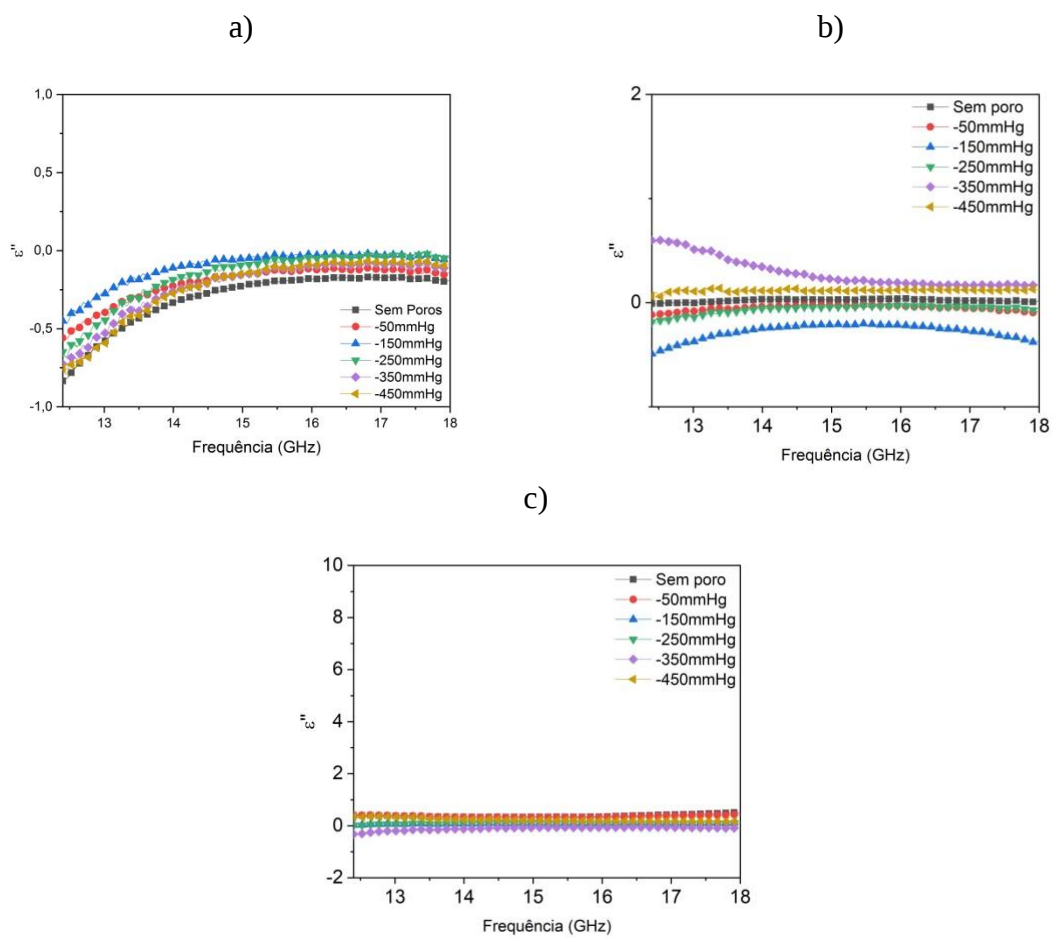
Para a parcela dissipativa elétrica, Figura 17, na variação de 60 e 70% de FC os valores foram constantes e quase nulos. Nas amostras de 50% de FC a Figura 17 demonstra que houve uma leve variação no começo da faixa de frequência (12,4 GHz) alcançando valores próximos a -1 , e a partir de 14,5 GHz começou a normalizar, assim como as demais, alcançando o zero. De maneira geral, os valores de fenômenos elétricos não foram os maiores, pois não houve o uso de aditivos elétricos para este estudo.

Figura 16 - Figura 16 - Permissividade real das composições de 50% (a), 60% (b) e 70% (c) dos compósitos porosos de FC na banda Ku.



Fonte: Produção do autor, 2024.

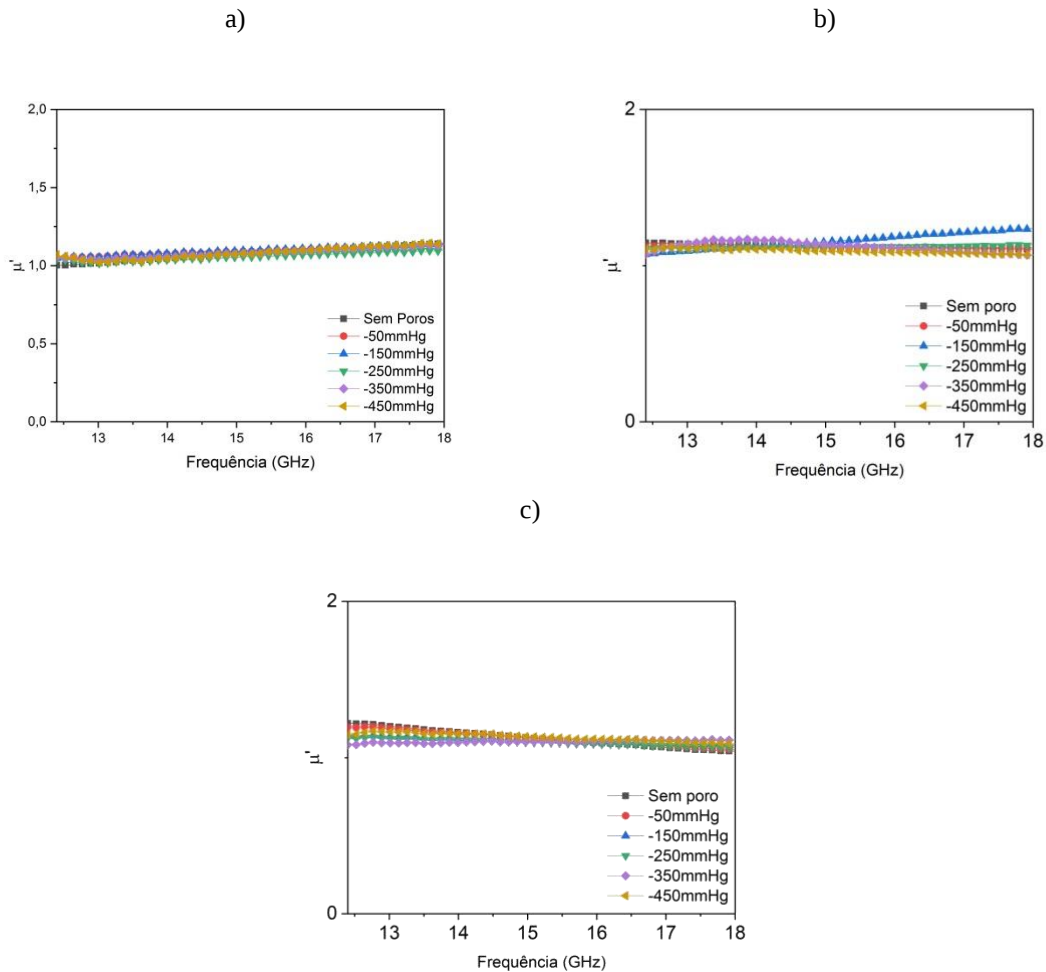
Figura 17 - Permissividade imaginária das composições de 50% (a), 60% (b) e 70% (c) dos compósitos porosos de FC na banda Ku.



Fonte: Produção do autor, 2024.

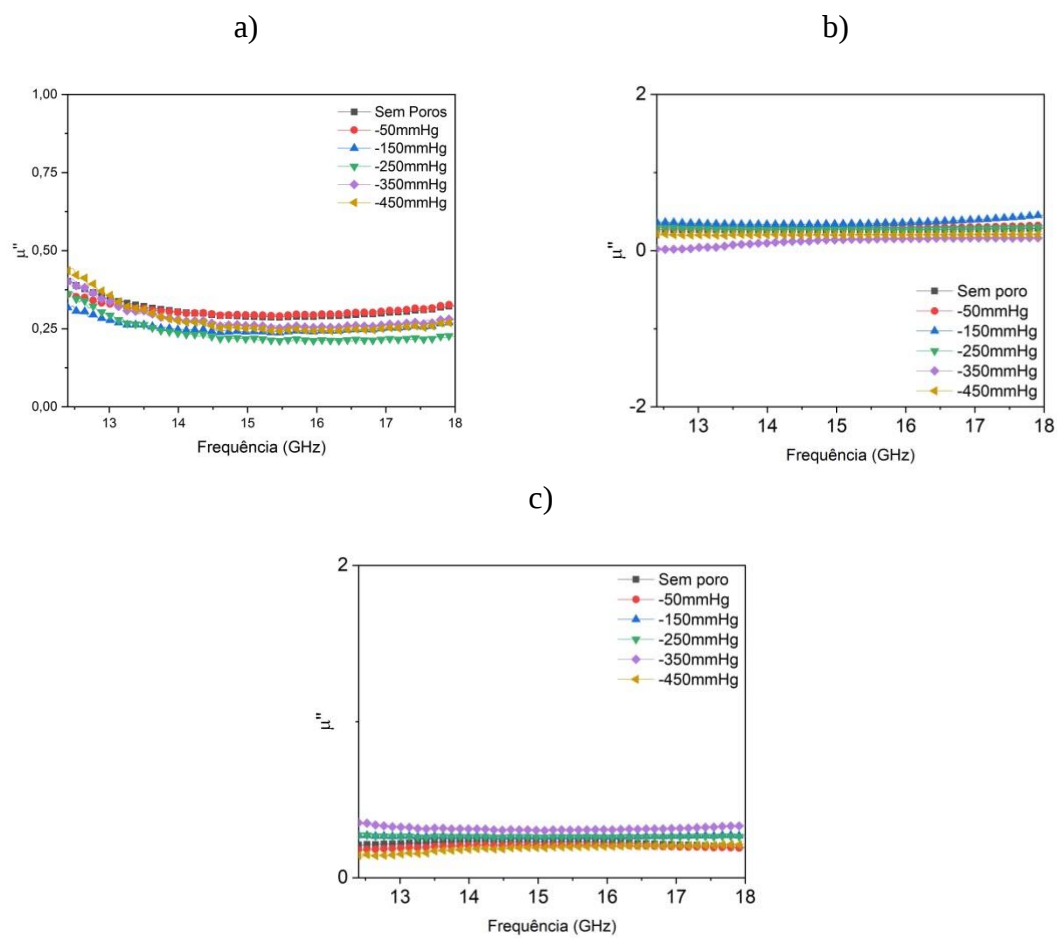
Os valores magnéticos deste estudo para a banda Ku permaneceram constantes. A Figura 18 indica que os resultados da permeabilidade real permaneceram em 1, e na Figura 19 a permeabilidade imaginária obteve valores praticamente nulos. Isso demonstra que a presença de poros pode ter prejudicado e não resultou em diferença para a parcela magnética nesta faixa de frequência, pois todos os níveis de poros obtiveram resultados similares.

Figura 18 - Permeabilidade real das composições de 50% (a), 60% (b) e 70% (c) dos compósitos porosos de FC na banda Ku.



Fonte: Produção do autor, 2024.

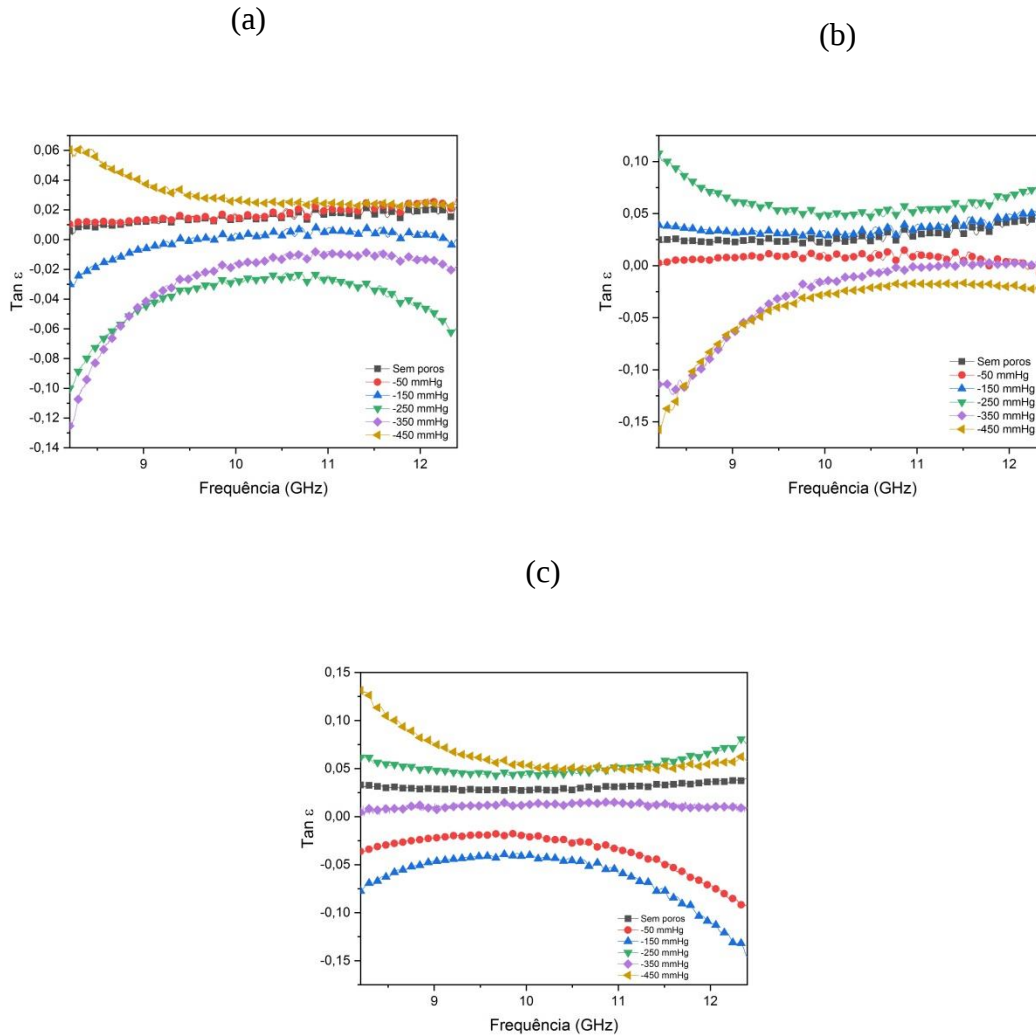
Figura 19 - Permeabilidade imaginária das composições de 50% (a), 60% (b) e 70% (c) dos compósitos porosos de FC na banda Ku.



Fonte: Produção do autor, 2024.

De acordo com a Figura 20, os resultados indicam que o aumento da concentração de FC gerou uma influência na variação da tangente de perda elétrica, é possível perceber majoritariamente resultados negativos, isso se dá pelo fenômeno de dissipação negativa, causado pelos valores de permissividade real e imaginária. Contudo, para melhor explicação, este fenômeno complexo deve ter um estudo mais aprofundado em trabalhos futuros.

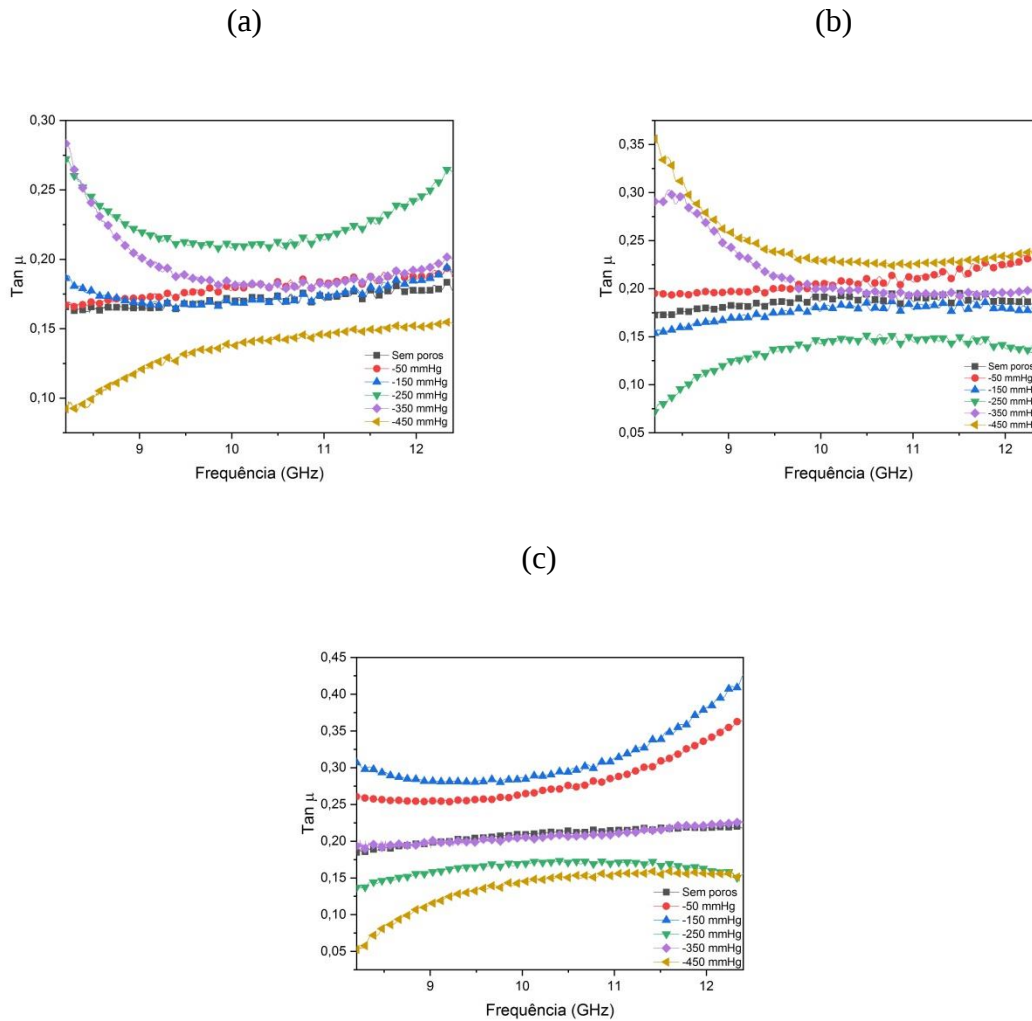
Figura 20 - Tangente de Perda elétrica das composições de 50% (a), 60% (b) e 70% (c) dos compósitos porosos de FC na banda X.



Fonte: Produção do autor, 2024.

A tangente de perda magnética obteve resultados maiores, se comparado com a elétrica, o que demonstra uma importante referência nos mecanismos de perda magnéticos majoritários no mecanismo de dissipação energia total dos materiais. Este fato pode ser associado as amostras que foram feitas com FC, que possui caráter magnético. De acordo com a Figura 21, a média do valor da amostra com 50% de FC foi de 0,17, enquanto as médias de 60 e 70% alcançaram 0,25.

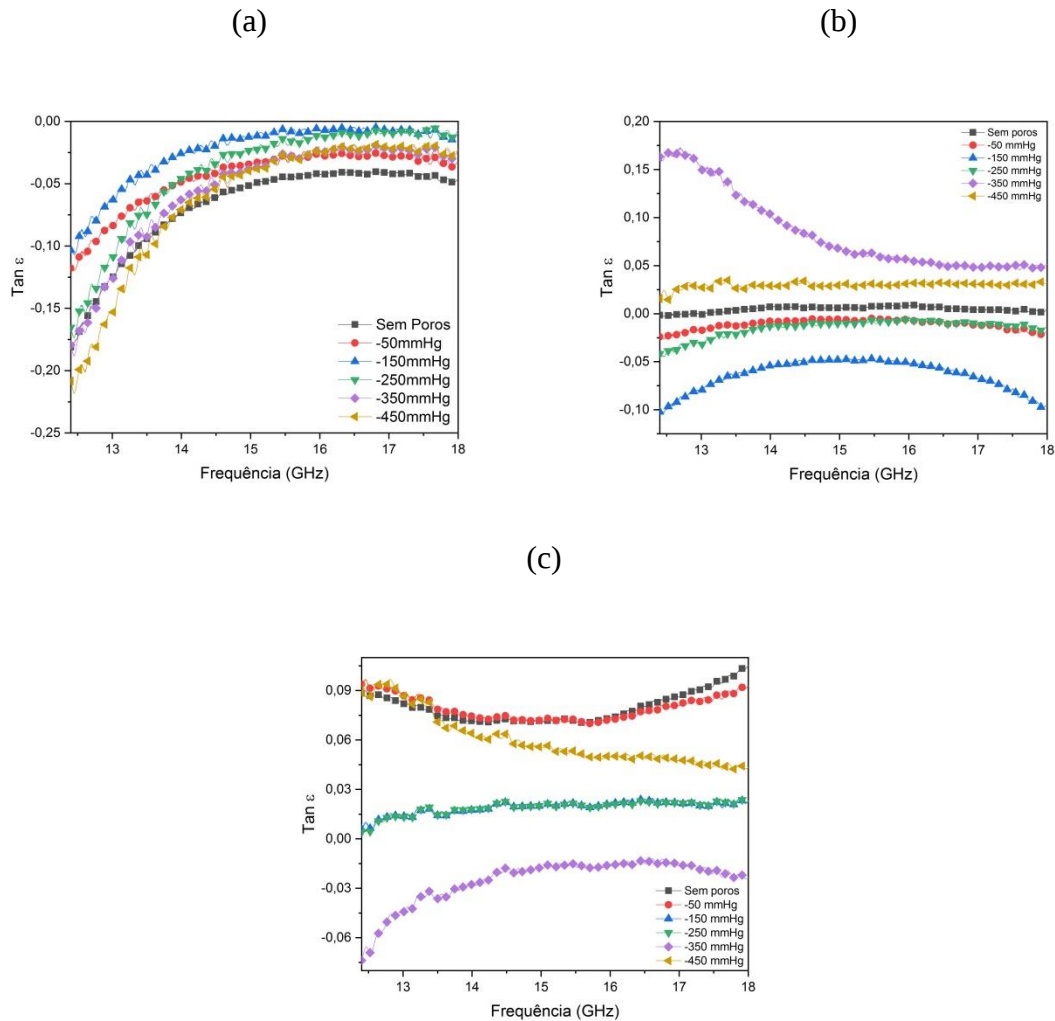
Figura 21 - Tangente de Perda magnética das composições de 50% (a), 60% (b) e 70% (c) dos compósitos porosos de FC na banda X.



Fonte: Produção do autor, 2024.

Assim como na banda X, a banda Ku também sofreu o fenômeno de dissipação negativa, conforme os resultados da Figura 22. Pelo fato de ter valores de permissividade real e imaginária negativos. De maneira geral, os valores desta tangente permaneceram próximos à zero.

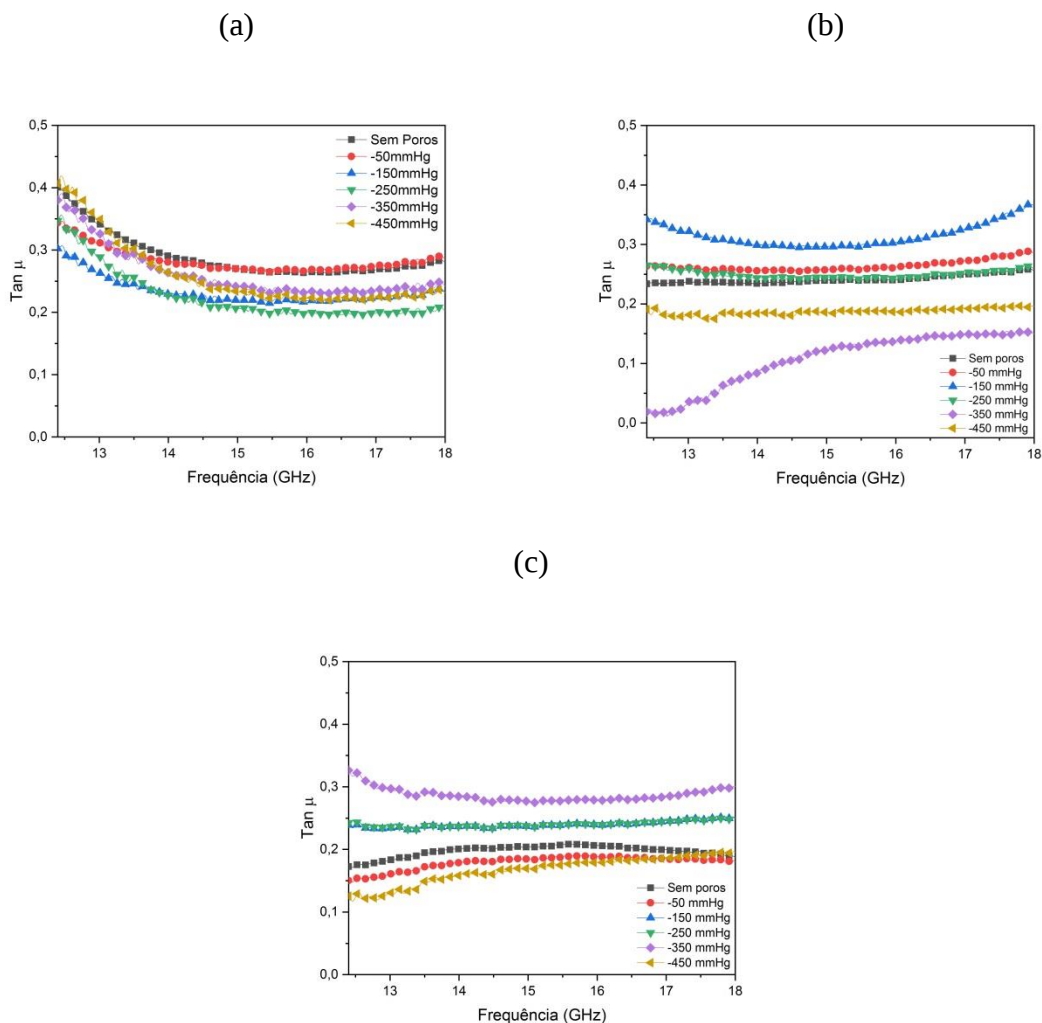
Figura 22 - Tangente de Perda elétrica das composições de 50% (a), 60% (b) e 70% (c) dos compósitos porosos de FC na banda Ku.



Fonte: Produção do autor, 2024.

A Figura 23 apresentou os valores de perda magnética da banda Ku sendo próximos à zero, diferente dos valores medidos para a banda X. Demonstrando que possivelmente nesta faixa de frequência a FC não desempenhe um papel de perda tão significativo.

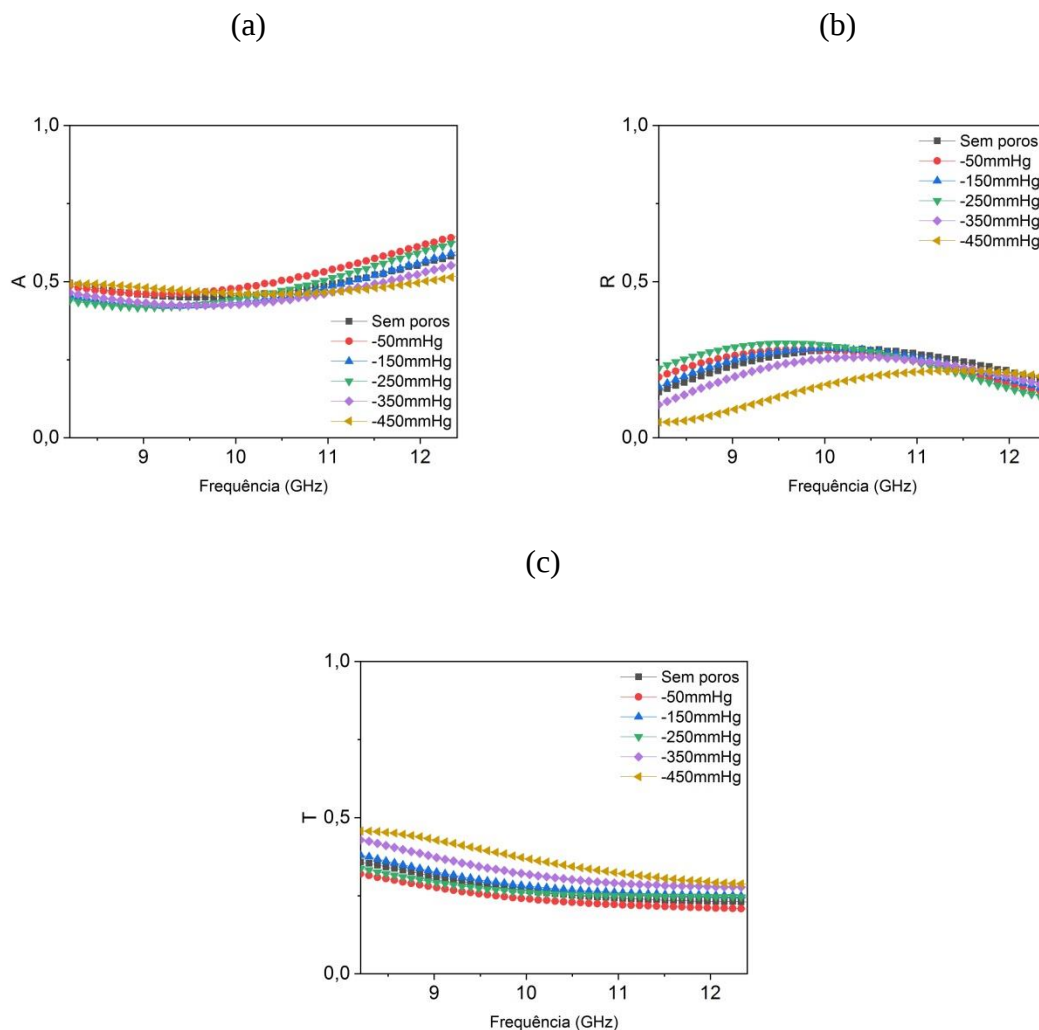
Figura 23 - Tangente de Perda magnética das composições de 50% (a), 60% (b) e 70% (c) dos compósitos porosos de FC na banda Ku.



Fonte: Produção do autor, 2024.

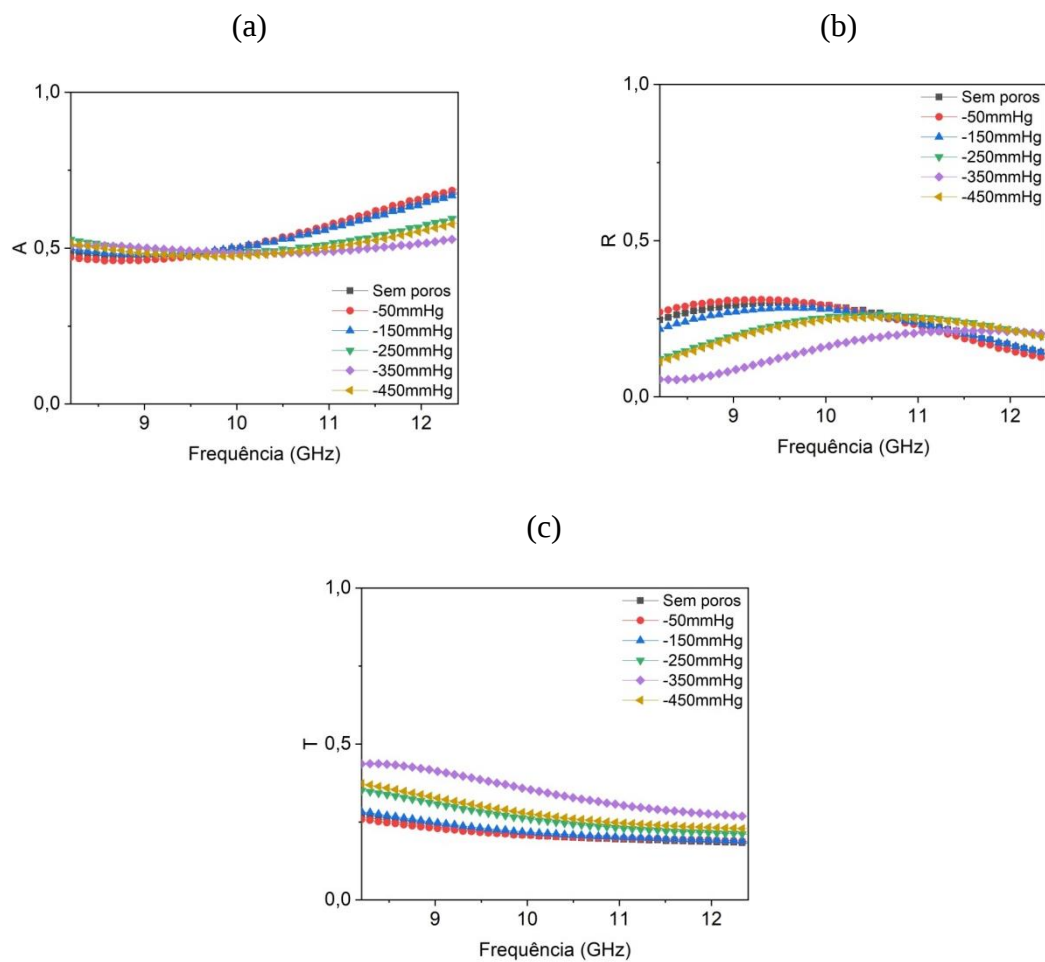
Os resultados obtidos a partir dos cálculos de absorvância (A), refletância (R) e transmitância (T) da banda X, demonstraram variações de acordo com o nível de porosidade das amostras, conforme as Figuras: Figura 24, Figura 25 e Figura 26. É possível observar que, nas três concentrações de FC, a energia absorvida permaneceu constante em 50%, enquanto a energia refletida subiu de 5% a 25%, o aumento é mais notável na amostra mais porosa (-450mmHg), e houve uma diminuição na energia transmitida, caindo de 40% a 25%. Tal fato pode ter acontecido devido à presença de poros nas amostras, fazendo com que o material sofra múltiplas reflexões no contato entre material e ar, o que é ilustrado posteriormente na Figura 30.

Figura 24 - Absorção (a), reflexão (b) e transmissão (c) na variação de 50% de FC na banda X.



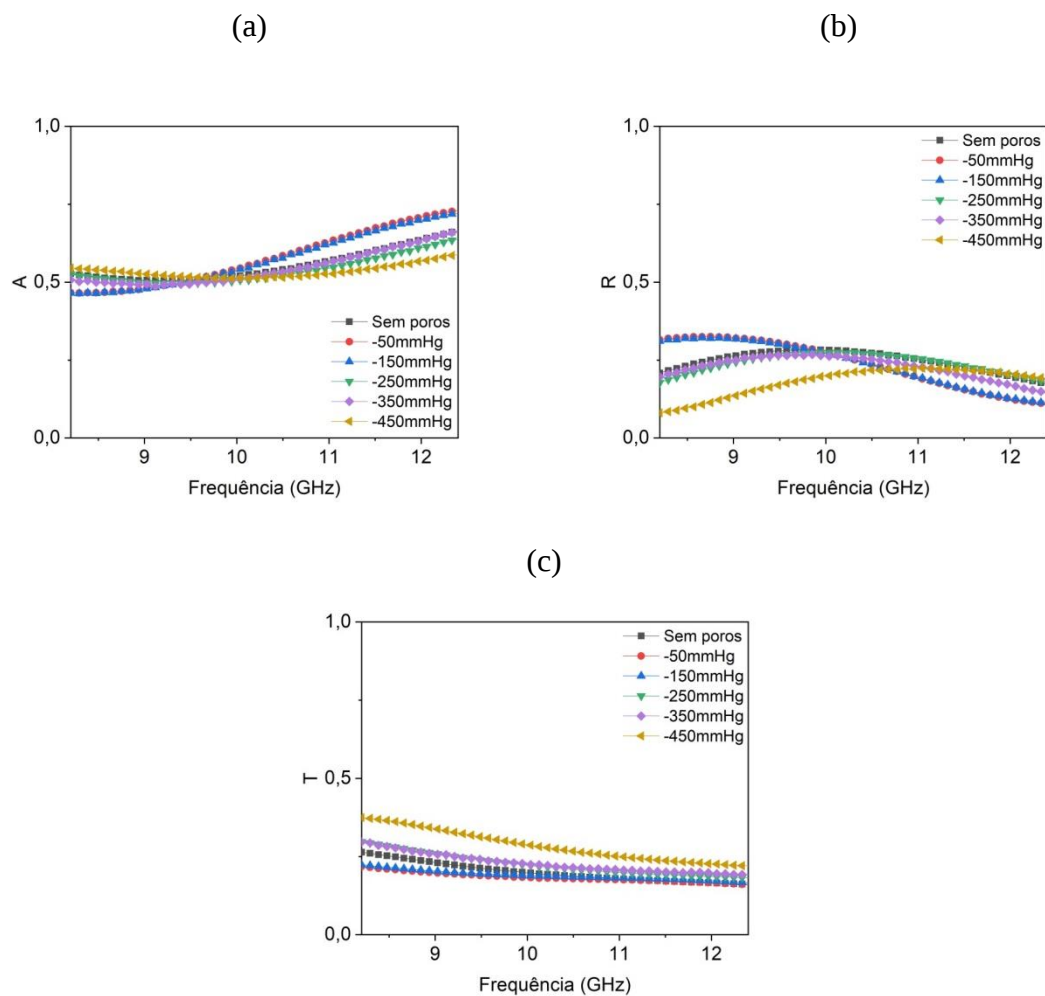
Fonte: Produção do autor, 2024.

Figura 25 - Absorção (a), reflexão (b) e transmissão (c) na variação de 60% de FC na banda X.



Fonte: Produção do autor, 2024.

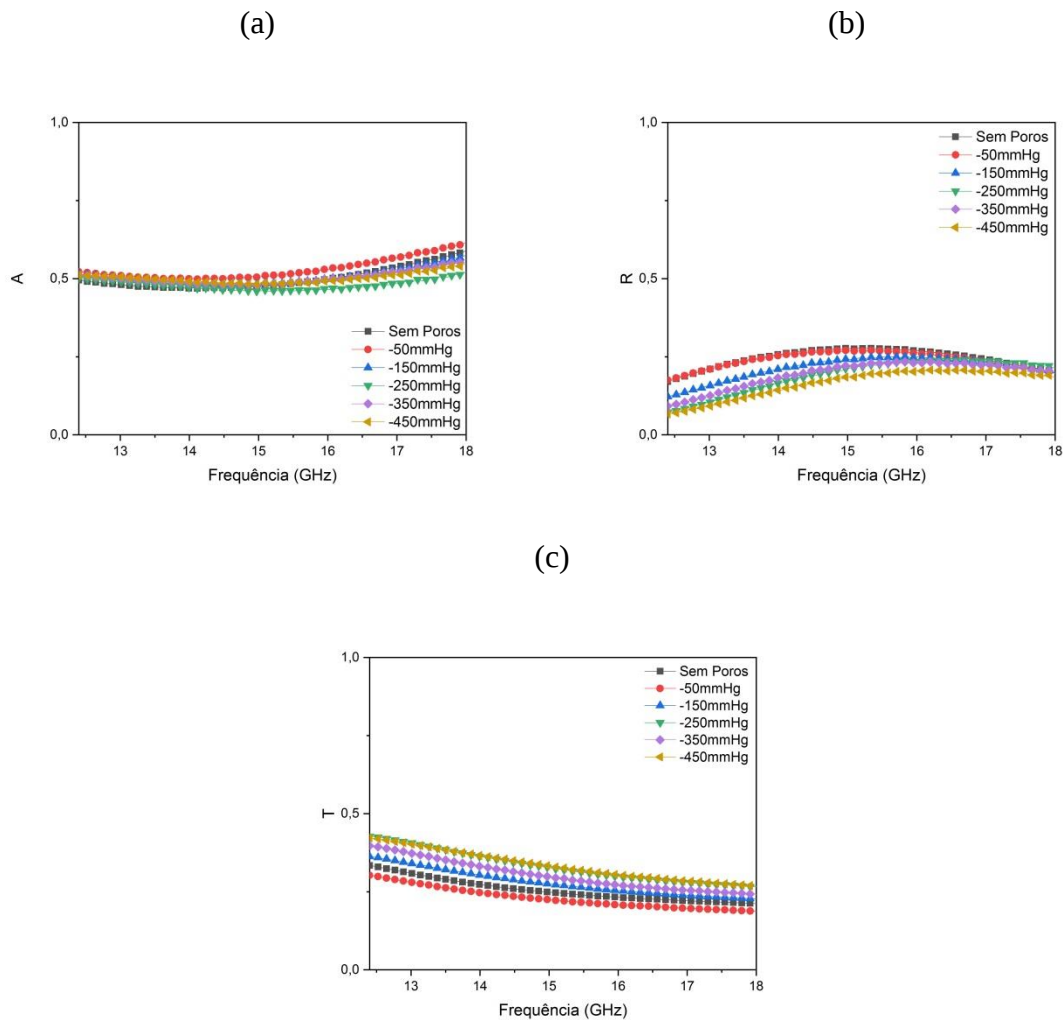
Figura 26 - Absorção (a), reflexão (b) e transmissão (c) na variação de 70% de FC na banda X.



Fonte: Produção do autor, 2024.

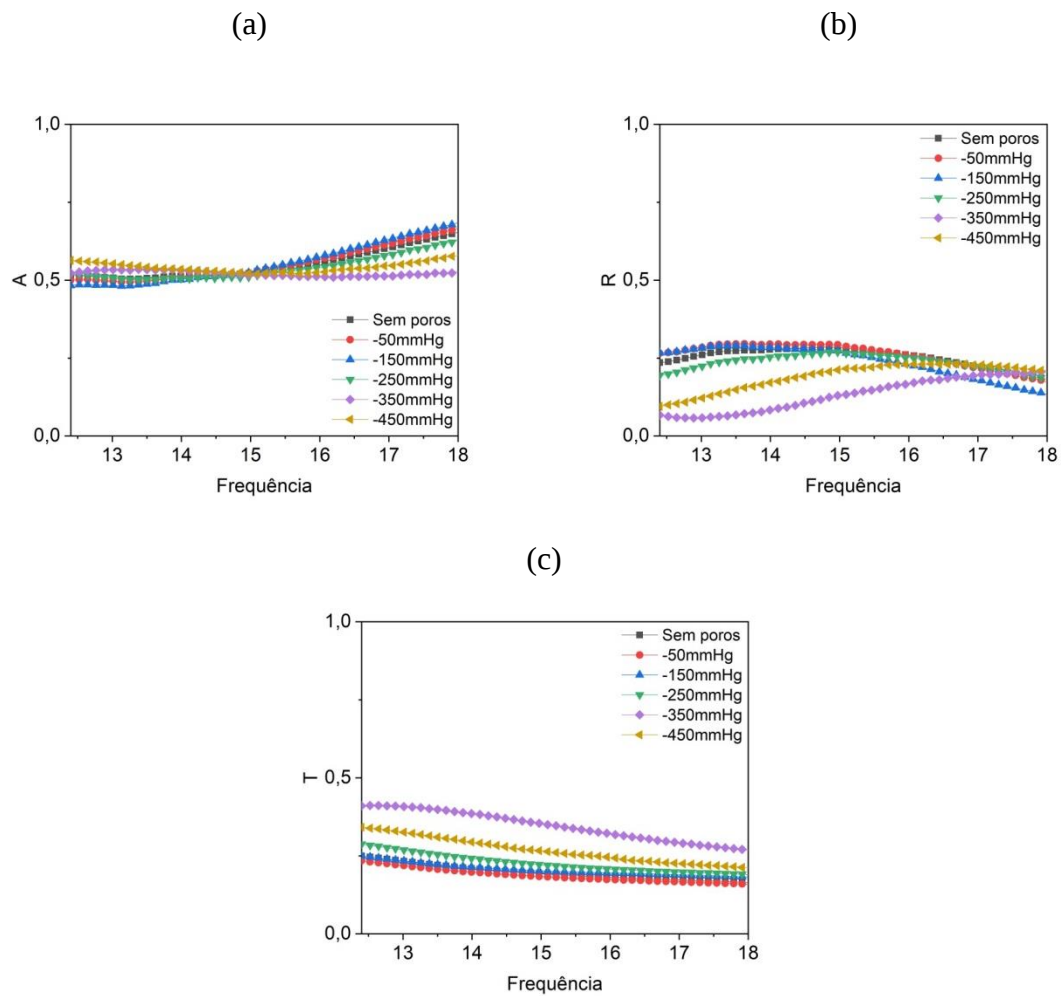
Para os cálculos de absorvência (A) na banda Ku, essa variável permaneceu constante em 50% assim como na banda X. A refletância (R) das amostras subiu ligeiramente, provavelmente devido à porosidade da mesma, visto que a amostra mais porosa (-450mmHg) obteve maior acréscimo na energia refletida. Por fim, a transmitância (T) diminuiu aproximadamente 20%, devido ao aumento da energia refletida, de acordo com as Figuras: Figura 27, Figura 28 e Figura 29.

Figura 27 - Absorção (a), reflexão (b) e transmissão (c) na variação de 50% de FC na banda Ku.



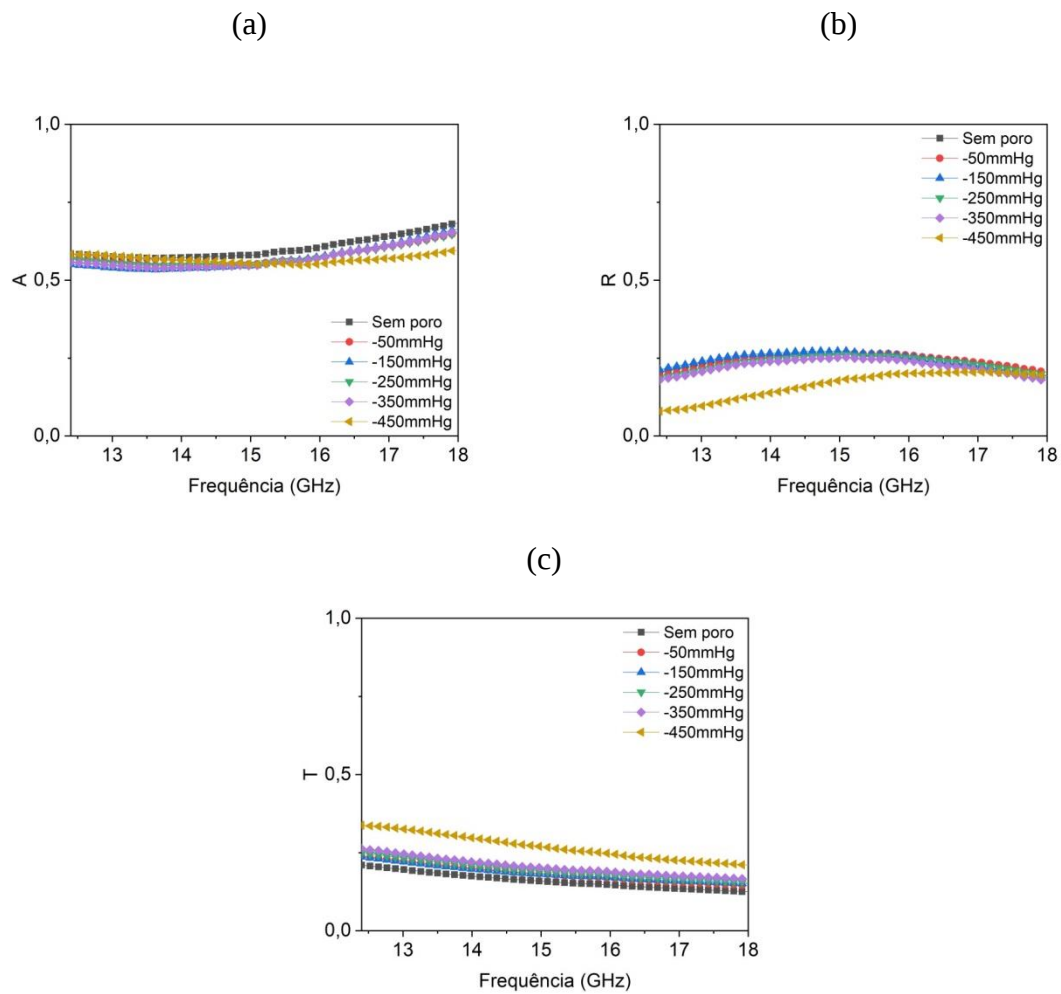
Fonte: Produção do autor, 2024.

Figura 28 - Absorção (a), reflexão (b) e transmissão (c) na variação de 60% de FC na banda Ku.



Fonte: Produção do autor, 2024.

Figura 29 - Absorção (a), reflexão (b) e transmissão (c) na variação de 70% de FC na banda Ku.

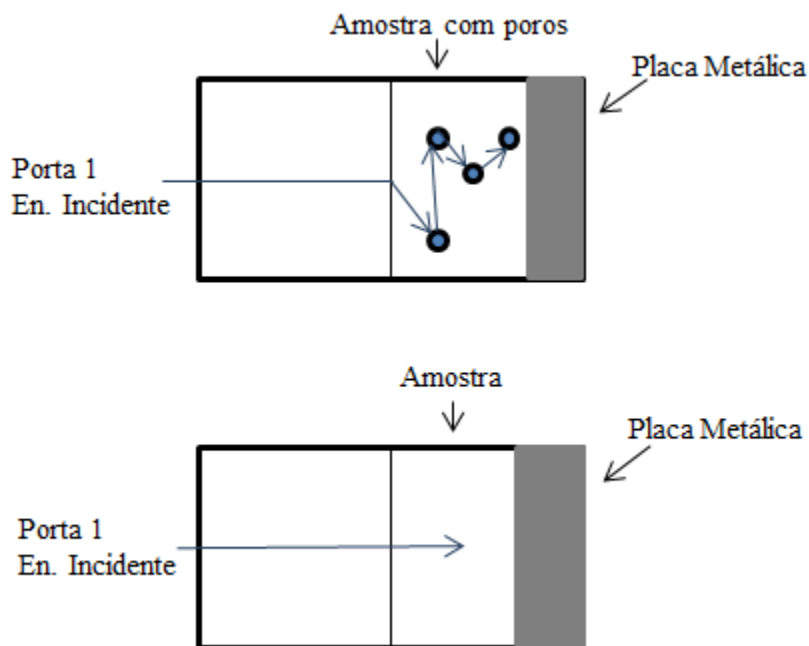


Fonte: Produção do autor, 2024.

5.3.1. Ensaio de Refletividade

O ensaio da refletividade é realizado utilizando uma placa metálica atrás das amostras, como demonstrado na Figura 30, é importante perceber que é possível obter resultados diferentes quando aplicados para diferentes faixas de frequência (Banda X e Ku). Este fato pode ser analisado conforme a equação 11, descrita anteriormente neste trabalho, a qual é uma grandeza inversamente proporcional, conforme se aumenta a espessura t da amostra, a frequência f diminui e é possível notar que o tamanho dos offsets de cada banda é diferente, assim consequentemente a espessura é outra, obtendo diferentes valores em cada faixa de frequência. Desta forma, é possível manipular em qual frequência se deseja obter o maior pico de atenuação.

Figura 30 - Comportamento das amostras com poros e sem poros no ensaio de refletividade.

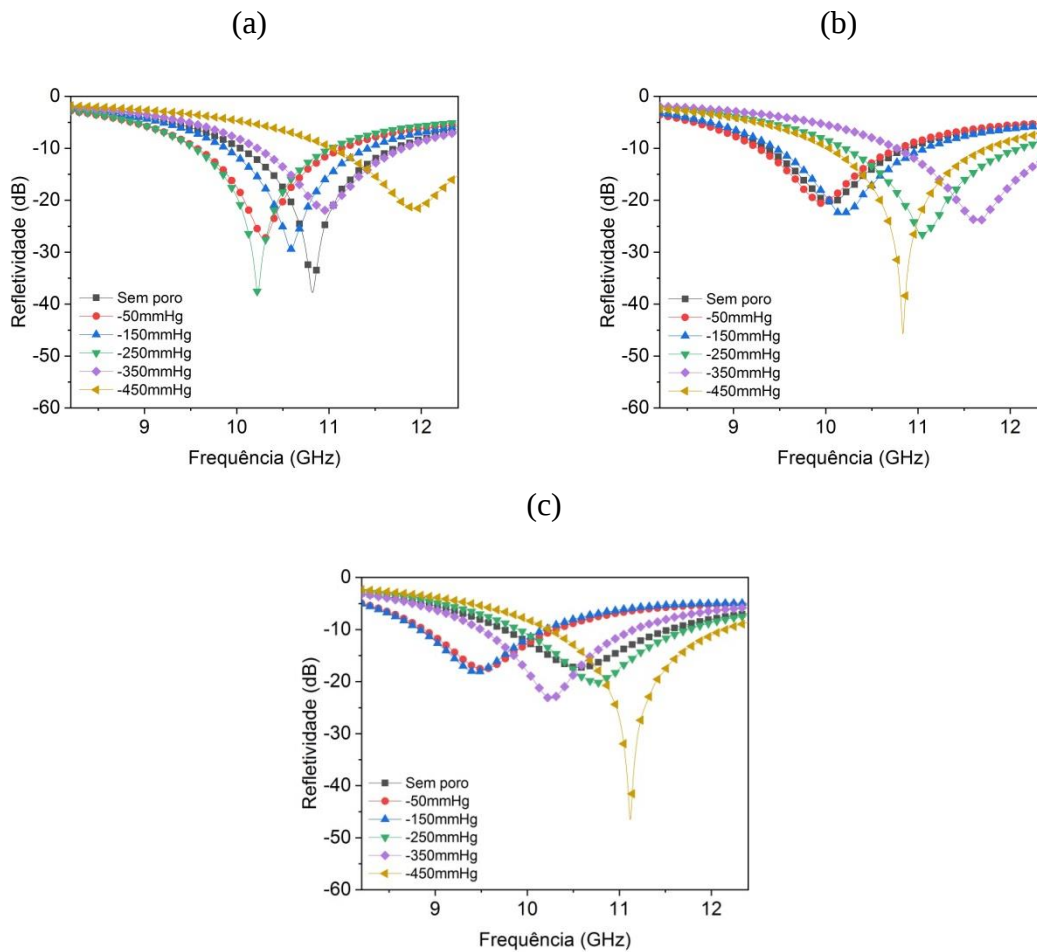


Fonte: Produção do autor, 2024.

No ensaio de refletividade, como já visto na Figura 30, a onda eletromagnética irá passar pela amostra e refletirá pela placa metálica, voltando assim para a porta 1, assim é possível saber o quanto a onda está refletindo. Dessa forma, uma amostra porosa, além de passar por este processo, terá múltiplas reflexões, devido seus poros, que dificultam a trajetória da onda. Assim, esse fenômeno influencia diretamente os resultados neste trabalho, pois é uma das causas do aumento da atenuação eletromagnética.

Na Figura 31 é possível observar que as amostras sem poros e com pouca pressão colocadas no vácuo tiveram picos maiores de absorção se comparado com a que teve maior pressão (-450 mmHg) que teve um pico de -21,66 dB ($\approx 99,31$) para a frequência 11,93 GHz. Porém, nos gráficos da Figura 31 (b) e (c) é mostrado que conforme se aumentou a quantidade de FC, os picos além de terem maiores valores de absorção, eles se deslocaram sobre a frequência, o que é explicado no tópico 3.2.3. pelas equações 6 e 7. Neste caso, a que mais se sucedeu foi a amostra com maior pressão (-450 mmHg), obtendo picos de -45,74 dB ($\approx 99,99$) na frequência 10,83 GHz para a amostra com 60% de FC, e para 70% de FC o pico foi de -46,50 dB ($\approx 99,99$) na frequência de 11,11GHz. Sendo assim, uso de poros em compósitos teve influência na atenuação da radiação eletromagnética, visto que os maiores picos se encontram nas amostras que sofreram mais pressão (-450 mmHg), ou seja, mais porosa.

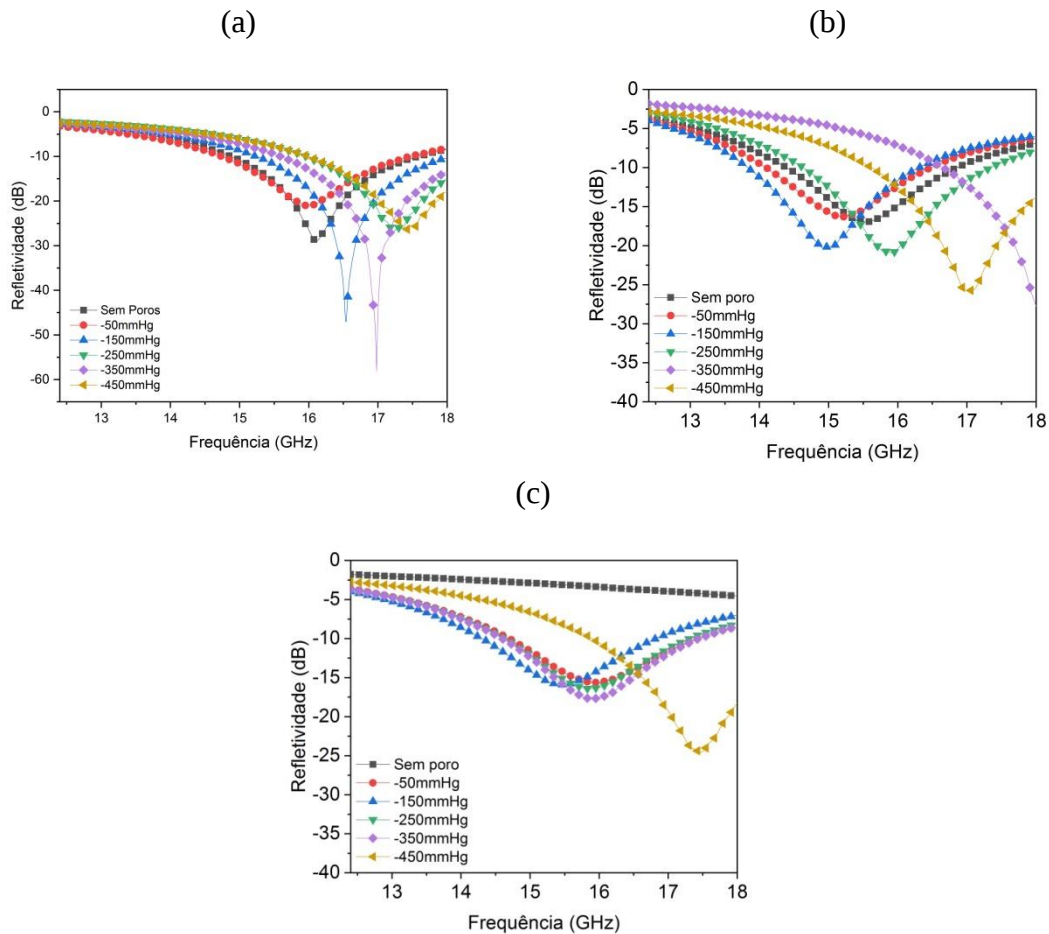
Figura 31 - Refletividade das amostras com concentrações de FC de 50% (a), 60% (b) e 70% (c) para a banda X.



Fonte: Produção do autor, 2024.

Para a banda Ku, o ensaio de refletividade obteve grandes variações nos resultados de acordo com a Figura 32. Nas amostras de 50 e 60% de FC os compósitos tiveram picos em diferentes frequências conforme Figura 32 (a) e (b), tendo picos de absorção a partir da frequência de 15 GHz em todos os níveis de poros. Os picos de atenuação eletromagnética, nesta banda, mudam na ordem conforme os níveis de pressão, essa propriedade permite manipular em qual frequência se deseja maior atenuação, demonstrando um dos objetivos deste estudo. Porém, nas amostras com 70% de FC a amostra sem poros permaneceu quase que constante, demonstrando que sem os poros sua influência nesta banda foi mínima. Para os outros níveis de poros o pico foi concentrado na frequência de 15,87 GHz, sendo diferente somente na pressão de -450mmHg que teve pico de -24,57 dB ($\approx 99,65$) para a frequência de 17,47 GHz.

Figura 32 - Refletividade das amostras com concentrações de FC de 50% (a), 60% (b) e 70% (c) para a banda Ku.

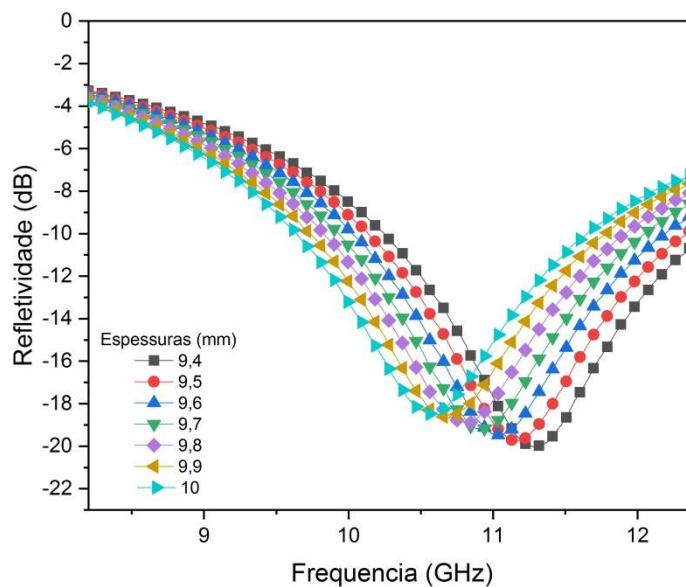


Fonte: Produção do autor, 2024.

5.4. Resultados das simulações eletromagnéticas

Foi simulado no software Feko da Altair®, o melhor resultado do ensaio de refletividade entre todas as amostras feitas variando as espessuras de 0,1 a 0,1mm, conforme Figura 33. O melhor resultado medido foi o de 70% de FC com 450mmHg de pressão no vácuo com espessura de 9,7mm. Assim, na simulação as espessuras foram variadas de 9,4mm à 10mm para estudo do comportamento das frequências em relação à espessura. Conforme a equação 11 é possível analisar no gráfico sua aplicação, pois o aumento da espessura provocou a diminuição da frequência, então cada espessura obteve um pico em frequências diferentes. Como já era previsto pela equação 11, a menor espessura (9,4 mm) obteve o melhor resultado de atenuação eletromagnética.

Figura 33 - Resultado da simulação do potencial de atenuação.



Fonte: Produção do autor, 2024.

6. Conclusões

A partir do método da cura das amostras à vácuo, nas pressões estabelecidas em -50, -150, -250, -350 e -450 mmHg percebeu-se que a maior quantidade de material poroso foi mostrada nas amostras de 70% de FC, porém todas as amostras obtiveram bons resultados de atenuação eletromagnética, cada nível de poro se comportou de forma diferente nas faixas de frequências analisadas (bandas X e Ku), tornando possível a aplicação na indústria por meio do controle de poros, conforme sua necessidade. E de que o aumento da quantidade de FC melhora a qualidade do processo de porosidade e também seus resultados.

Como neste trabalho não foram adicionados particulados elétricos, não houve grandes variações nas parcelas de permissividade real ϵ' e imaginária ϵ'' , porém estas não prejudicaram a parcela magnética do compósito.

A partir do método da refletividade, foi possível perceber que tanto na banda X quanto na banda Ku resultados promissores. Visto que, quanto mais se diminui a pressão no vácuo, melhores eram os resultados de absorção eletromagnética, para 70% de FC o pico foi de -46,50 dB ($\approx 99,99$) na frequência de 11,11 GHz, com a pressão de -450 mmHg na bomba de vácuo. Assim, com a ajuda dos poros nos compósitos é possível ver um grande aumento no rendimento dos ensaios de refletividade, em ambas as faixas de frequência estudadas neste trabalho.

7. Referências Bibliográficas

- Canevaloro Junior, S. V. Ciência dos polímeros. 2. ed. São Paulo: [s.n.], 2010. 277 p.
- Carter, C. B.; Norton, M. G. Ceramic materials. New York, NY: Springer, 2013. ISBN 978-1-4614-3522-8.
- Chen, Y., Niu, Y., Tian, T., Zhang, J., Wang, Y., Li, Y., & Qin, L. C. (2017). Microbial reduction of graphene oxide by *Azotobacter chroococcum*. *Chemical Physics Letters*, 677(April), 143–147. <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2017.04.002>
- Chung, D. D. L. (2001). Electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon materials. *Carbon*, 39(2), 279–285. [https://doi.org/10.1016/S0008-6223\(00\)00184-6](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(00)00184-6)
- da Silva, V. A., Pereira, J. J., Nohara, E. L., & Rezende, M. C. (2009). Comportamento eletromagnético de materiais absorvedores de micro-ondas baseados em hexaferrita de Ca modificada com íons Co Ti e dopada com La. *Journal of Aerospace Technology and Management*, 1(2), 255–263. <https://doi.org/10.5028/jatm.2009.0102255263>
- Deng, Hongwei et al. Y2Mo3O12 modified carbonyl iron powder-boron-phenolic resin coatings for microwave absorption. *Applied Physics A*, v. 128, n. 10, p. 888, 2022.
- Gama, A. M. (n.d.). Radiação Eletromagnética À Base De Ferro Carbonila E Silicone.
- Gama, A. M., & Rezende, M. C. (2010). Complex permeability and permittivity variation of carbonyl iron rubber in the frequency range of 2 to 18 GHz. *Journal of Aerospace Technology and Management*, 2(1), 59–62. <https://doi.org/10.5028/jatm.2010.02015962>
- Karimi, P., Ostoj-Starzewski, M., & Jasiuk, I. (2016). Experimental and computational study of shielding effectiveness of polycarbonate carbon nanocomposites. *Journal of Applied Physics*, 120(14). <https://doi.org/10.1063/1.4964691>
- Kashi, S.; Varley, R.; Souza, M.; Al-Assafi, S.; Di Pietro, A.; Lavigne, C.; Fox, B. Mechanical, thermal, and morphological behavior of silicone rubber during accelerated aging. *Polymer - Plastics Technology and Engineering*, v. 57, n. 16, p. 1687–1696, 2018.
- Klygach, D. S., Vakhitov, M. G., Suvorov, P. V., Zhrebtsov, D. A., Trukhanov, S. V., Kozlovskiy, A. L., Zdorovets, M. V., & Trukhanov, A. V. (2019). Magnetic and microwave properties of carbonyl iron in the high frequency range. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 490(June), 165493. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.165493>
- Liu, L., Duan, Y., Ma, L., Liu, S., & Yu, Z. (2010). Microwave absorption properties of a wave-absorbing coating employing carbonyl-iron powder and carbon black. *Applied Surface Science*, 257(3), 842–846. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2010.07.078>
- Lopes, B. H. K., Portes, R. C., do Amaral Junior, M. A., Florez-Vergara, D. E., Gama, A. M., Silva, V. A., Quirino, S. F., & Baldan, M. R. (2020). X Band electromagnetic property influence of multi-walled carbon nanotube in hybrid MnZn ferrite and carbonyl iron composites. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(2), 2369–2375. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.12.068>

Lopes, Braulio Haruo Kondo 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) / Braulio Haruo Kondo Lopes. - São José dos Campos: INPE, 2019.

Medeiros, Nila Cecília de Faria Lopes et al. Sustainable Carbon Xerogel in the Production of Electromagnetic Radar Absorbing Composites in the Ku-Band. *Materials Research*, v. 25, 2022.

Meng, W., Yuping, D., Shunhua, L., Xiaogang, L., & Zhijiang, J. (2009). Absorption properties of carbonyl-iron/carbon black double-layer microwave absorbers. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 321(20), 3442–3446. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2009.06.040>

Mishra, M., Singh, A. P., & Dhawan, S. K. (2013). Expanded graphite-nanoferrite-fly ash composites for shielding of electromagnetic pollution. *Journal of Alloys and Compounds*, 557, 244–251. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.01.004>

Mishra, S., Katti, P., Kumar, S., & Bose, S. (2019). Macroporous epoxy-carbon fiber structures with a sacrificial 3D printed polymeric mesh suppresses electromagnetic radiation. *Chemical Engineering Journal*, 357(August 2018), 384–394. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.09.119>

Orfanidis, S. J. Waves and antennas electromagnetic. [S.l: s.n.], 2016. 1188 p.

Pinho, M. S., Lima, R. C., Soares, B. G., & Nunes, R. C. R. (1999). Avaliação do desempenho de materiais absorvedores de radiação eletromagnética por guia de ondas. *Polímeros*, 9(4), 23–26. <https://doi.org/10.1590/s0104-14281999000400004>

Portes, R. C., Lopes, B. H. K., Do Amaral Junior, M. A., Florez-Vergara, D. E., Quirino, S. F., & Baldan, M. R. (2019). Effect of granulometric distribution on electromagnetic shielding effectiveness for polymeric composite based on natural graphite. *Science and Engineering of Composite Materials*, 26(1), 531–539. <https://doi.org/10.1515/secm-2019-0037>

PRZYBYŁ, Wojciech et al. Microwave absorption properties of carbonyl iron-based paint coatings for military applications. *Defence Technology*, v. 22, p. 1-9, 2023.

Shen, Yinong; LI, Qinghua; XU, Shilang. 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, p. 104559, 2022.

Shi, Qiong et al. 3D lamellar skeletal network of porous carbon derived from hull of water chestnut with excellent microwave absorption properties. *Journal of Colloid and Interface Science*, v. 641, p. 449-458, 2023.

Shu, R., Zhang, G., Zhang, J., Wang, X., Wang, M., Gan, Y., Shi, J., & He, J. (2018). Fabrication of reduced graphene oxide/multi-walled carbon nanotubes/zinc ferrite hybrid composites as high-performance microwave absorbers. *Journal of Alloys and Compounds*, 736, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.11.084>

Xu, Y., Yan, Z., & Zhang, D. (2015). Microwave absorbing property of a hybrid absorbent with carbonyl irons coating on the graphite. *Applied Surface Science*, 356, 1032–1038. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.08.162>

Xu, Y., Zhang, D., Cai, J., Yuan, L., & Zhang, W. (2013). Microwave absorbing property of silicone rubber composites with added carbonyl iron particles and graphite platelet. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 327, 82–86. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2012.09.045>

Yang, Xuan et al. Constructing three-dimensional reticulated carbonyl iron/carbon foam composites to achieve temperature-stable broadband microwave absorption performance. *Carbon*, v. 188, p. 376-384, 2022.

Zhang, Yiqin et al. Metal-organic frameworks derived carbon nanotube and carbonyl iron composite materials for broadband microwave absorbers with a wide filling range. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, v. 555, p. 169391, 2022.

Zhang, Huihui et al. Microwave absorbing property of gelcasting SiC-Si₃N₄ ceramics with hierarchical pore structures. *Journal of the European Ceramic Society*, v. 42, n. 4, p. 1249-1257, 2022.