



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

**ESTUDO DO POTENCIAL DE ATENUAÇÃO DE COMPÓSITOS
MAGNÉTICOS COM SUPERFÍCIE SELETORA DE FREQUÊNCIA
(FSS) NA BANDA X DE 8.2 A 12.4 GHZ.**

Gabriel de Azevedo Carvalho dos Reis

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

RESUMO

O seguinte trabalho aborda o estudo do potencial de atenuação de compósitos magnéticos com superfícies seletoras de frequência (FSS) na banda X (8.2 a 12.4 GHz). A poluição eletromagnética tem aumentado com a proliferação de dispositivos eletrônicos e a chegada do 5G, trazendo preocupações sobre os efeitos da radiação eletromagnética na saúde e no meio ambiente. No setor aeroespacial, a mitigação dessa poluição é crucial para a eficácia das comunicações por satélite. O estudo explora a aplicação de FSS em compósitos, focando na melhoria da atenuação na faixa de frequência da banda X. O particulado de Ferrocarbonila foi escolhido por suas propriedades magnéticas, ampliando o escopo de aplicação. A pesquisa incluiu a elaboração de moldes por meio de CAD e a produção de amostras com diferentes formatos de FSS, utilizando o polidimetilsiloxano (PDMS) como matriz. A análise foi realizada com um Analisador de Rede Vetorial (VNA), medindo parâmetros como permissividade elétrica, permeabilidade magnética e perda por reflexão. Os resultados mostram que a implementação de FSS pode reduzir significativamente a refletividade, dependendo do formato geométrico e do espaçamento dos centros das superfícies seletoras de frequência, tendo como seu melhor resultado uma perda de refletividade de -29Db na frequência de 10,7 GHz. Um resultado considerável quando se leva em consideração que quanto maior a perda melhor para sua aplicação como material absorvedor. Este trabalho contribui para a compreensão e desenvolvimento de materiais que possam mitigar a poluição eletromagnética, sendo relevante para aplicações em comunicações por satélite e outras áreas onde a gestão de interferências eletromagnéticas é crítica.

Palavras-chave: Banda X. Materiais compósitos. FSS. Comunicação de satélites.

ABSTRACT

The following work addresses the study of the attenuation potential of magnetic composites with frequency selective surfaces (FSS) in the X-band (8.2 to 12.4 GHz). Electromagnetic pollution has increased with the proliferation of electronic devices and the advent of 5G, raising concerns about the effects of electromagnetic radiation on health and the environment. In the aerospace sector, mitigating this pollution is crucial for the effectiveness of satellite communications. The study explores the application of FSS in composites, focusing on improving attenuation in the X-band frequency range. Iron carbonyl particulate was chosen for its magnetic properties, broadening the scope of application. The research included the design of molds using CAD and the production of samples with different FSS geometries, using polydimethylsiloxane (PDMS) as a matrix. Analysis was conducted using a Vector Network Analyzer (VNA), measuring parameters such as electrical permittivity, magnetic permeability, and reflection loss. Results show that implementing FSS can significantly reduce reflectivity, depending on the geometric shape and spacing of the frequency selective surfaces, with the best result achieving a reflectivity loss of -29 dB at 10.7 GHz. This is a significant finding considering that higher loss is better for its application as an absorbing material. This work contributes to the understanding and development of materials that can mitigate electromagnetic pollution, being relevant for applications in satellite communications and other areas where managing electromagnetic interference is critical.

Keywords: X-band. Composite materials. FSS. Satellite communication.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 1 - Representação esquemática do parâmetro de espalhamento.....	20
Figura 2 - Representação esquemática do ensaio de refletividade utilizando um guia de onda.....	22
Figura 3 - Representação da estrutura da ferropentacarbonila	24
Figura 4 - Processo de purificação da Ferro-pentacarbonila.....	25
Figura 5 - Medidas gerais das amostras e Dx.....	26
Figura 6 - Imagem dos moldes desenvolvidos em CAD.....	27
Figura 7 - Representação da estrutura da ferrocarbonila.....	28
Figura 8 - Amostras com FSS em diferentes formatos.....	29
Figura 9 - Analisador de rede Vetorial em conjunto com guia de onda para banda X.....	30
Figura 10 - Sistema para simulações do ensaio de refletividade em guia de onda, (a) vistas do sistema e (b) sistema com amostra com e sem FSS	32
Figura 11 - Relação dos índices de espalhamento e faixa de frequência.	33
Figura 12 - Resultado de Permissividade Elétrica e Permeabilidade Magnética da Amostra sem FSS.	34
Figura 13 - Resultado das Análises de Reflection Loss de diferentes amostras	35
Figura 14 - Potencial de atenuação da amostra de 70% FC sem FSS, dados simulados e medidos.....	36

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 1 - Proporções utilizadas.....	29
Tabela 2 - Melhores resultados de cada formato de FSS	36

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

FSS	Frequency Selective Surface (Superfície seletora de Frequência)
RL	Reflection Loss (Perda de Reflexão)
SPG	Serviço de Pós-Graduação
TDI	Teses e Dissertações Internas

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área, m ²
$\uparrow_+, \uparrow_-$	Girofrequência para o próton e para o elétron, respectivamente
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

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1. INTRODUÇÃO.....	17
2. OBJETIVOS.....	18
2.1. Objetivos específicos.....	19
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
3.1. Parâmetro de Espalhamento	19
3.2. Caracterização Eletromagnética.....	20
3.3. Ensaio de Refletividade	21
3.4. Superfícies Seletoras de Frequência (FSS).....	22
3.5. Materiais utilizados	23
3.5.1. Aditivo Magnético	23
3.5.2. Matriz Dielétrica	25
4. METODOLOGIA	26
4.1. Elaboração dos moldes	26
4.2. Fabricação das Amostras	27
4.3. Proporções	29
4.4. Obtenção dos resultados	30
4.5. Simulação	31
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	32
5.1. Índices de absorbância, transmitância e refletância	33
5.2. Propriedades eletromagnéticas	33
5.3. Ensaio de refletividade.....	34
5.4. Simulação	36
6. CONCLUSÃO	37
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39

1. INTRODUÇÃO

A crescente presença da poluição eletromagnética no cotidiano remonta a décadas atrás, quando as primeiras tecnologias de comunicação sem fio começaram a surgir. Desde então, a proliferação de dispositivos eletrônicos, como telefones celulares, redes Wi-Fi e transmissões de televisão, tem contribuído para um aumento significativo na exposição às ondas eletromagnéticas.

Com o início do 5G e sua promessa de velocidade de comunicação mais rápida e maior largura de banda, trouxe consigo preocupações adicionais sobre os potenciais efeitos da radiação eletromagnética na saúde humana e no meio ambiente. No setor aeroespacial, a importância da suavização da poluição eletromagnética é ainda mais crucial (LAN, 2024) (XIONG, 2024) (ZHANG, 2024). Os satélites de comunicação como o Satélite Geoestacionário de Defesa e Comunicações Estratégica (SGDC), que possui uma variedade de aplicações, desde transmissão de dados com alta velocidade, funcionando na banda Ka e tendo uma parte exclusiva focada em banda X (QIAO, 2024) (HAN, 2024), para uso exclusivo militar, dependem de sinais de comunicação claros e livres de interferências para operar de forma eficaz (Liu et al., 2022). Qualquer interferência eletromagnética pode comprometer gravemente a integridade desses sinais, levando à perda de dados ou à interrupção do serviço. Assim, a gestão e o controle da poluição eletromagnética são fundamentais para garantir o funcionamento adequado e a confiabilidade das operações espaciais.

O presente estudo concentra-se na busca por soluções eficazes para mitigar essa poluição eletromagnética, com enfoque na otimização de materiais absorvedores de radiações (Zhao et al., 2022). Em particular, destaca-se a superfície seletora de frequência (Frequency Selective Surface - FSS) como uma opção estratégica (MANOKARAN, 2024) (LIU, 2024) (DING, 2024). Este trabalho se propõe a explorar a aplicação de FSS em compósitos, visando aprimorar sua capacidade de atenuação, especialmente na faixa de frequência da Banda X (8,2 – 12,4 GHz), amplamente utilizada em comunicações por satélite.

A escolha do particulado de Ferro Carbonila (ZHOU, 2024) (HUANG, 2024), fornecido pela BASF, revela-se crucial para conferir propriedades magnéticas aos compósitos, ampliando o escopo de aplicação além dos materiais tradicionalmente elétricos, como o cobre e o alumínio (KANNA,2024) (QU, 2024). A pesquisa, estruturada em fases, incluindo a elaboração de moldes por meio de CAD e a produção de amostras com diferentes formatos de FSS, visa explorar a eficácia desses compósitos em condições variadas.

Além disso, o estudo incorpora uma abordagem detalhada na seleção dos materiais, com destaque para a utilização do polidimetilsiloxano (PDMS) como matriz, oferecendo uma composição balanceada. A análise subsequente, realizada por meio de um Vector Network Analyzer (VNA), abrange a obtenção de dados essenciais, como Permissividade Elétrica, Permeabilidade Magnética e Reflection Loss (RL), contribuindo para uma compreensão abrangente do comportamento eletromagnético das amostras.

Este trabalho representa um passo significativo na pesquisa de soluções eficazes para a poluição eletromagnética, promovendo o desenvolvimento de tecnologias futuras.

2. OBJETIVOS

O propósito desta pesquisa consiste em formular compósitos mediante a aplicação de Superfícies Seletoras de Frequência, conhecidas em inglês como Frequency Selective Surfaces (FSS). Estes compósitos visam oferecer uma notável capacidade de atenuação radiações eletromagnéticas específicas, empregadas no setor aeroespacial, notadamente na Banda X. Além de contribuir para o avanço de tecnologias futuras.

2.1. Objetivos específicos

Validar o uso de FSS em materiais compósitos magnético determinando os parâmetros de cada superfície, para que seja encontrado o melhor potencial de atenuação eletromagnético, para que possa ser apontado a melhor geometria tendo em vista aplicar os materiais em condições de mercado.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. Parâmetro de Espalhamento

O parâmetro S, também conhecido como parâmetro de espalhamento, é uma medida crucial na análise de materiais. O parâmetro S é composto por elementos complexos que representam a amplitude e a fase das ondas refletidas e transmitidas em diferentes portas de um sistema. Esses elementos são normalmente apresentados em forma de matriz, onde cada valor indica a magnitude e a fase da reflexão ou transmissão em uma determinada porta, em resposta a um sinal aplicado em outra porta.

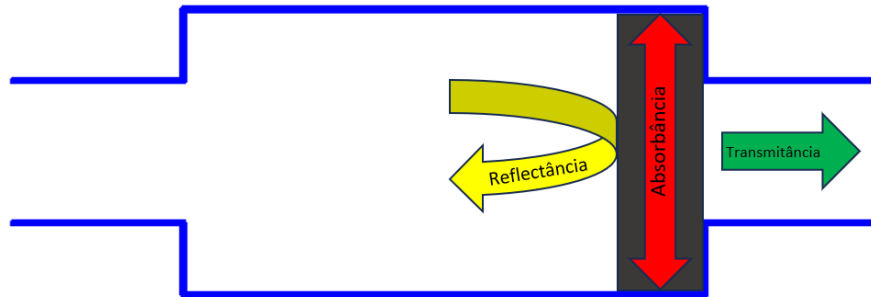
Ao analisar o parâmetro S, podemos identificar algumas propriedades eletromagnéticas do material como por exemplo a Absorbância, a Refletância e Transmitância do material (ART). Os parâmetros A, R e T são descritos em função dos parâmetros S conforme as equações 3, 4 e 5.

$$R = |S_{22}|^2 = |S_{11}|^2 \quad \text{(Equação 3)}$$

$$T = |S_{21}|^2 = |S_{12}|^2 \quad \text{(Equação 4)}$$

$$A = 1-(R+T) \quad \text{(Equação 5)}$$

Figura 1 - Representação esquemática do parâmetro de espalhamento.



Fonte: Produção do autor.

3.2. Caracterização Eletromagnética

A caracterização eletromagnética, fundamental para compreender o comportamento dos materiais em relação às ondas eletromagnéticas, abrange uma análise detalhada das propriedades elétricas e magnéticas desses materiais em diversas faixas de frequência. Neste estudo, utilizou-se o método de Nicholson-Ross-Weir (NRW), reconhecido por sua abordagem específica e eficaz na determinação de propriedades complexas, como a Permissividade Elétrica (ϵ) e a Permeabilidade Magnética (μ) (Plyushch et al., 2019). No entanto, é importante destacar uma limitação inerente a esse método: ele só pode ser aplicado a amostras homogêneas. Como resultado dessa restrição, foi possível obter resultados de caracterização eletromagnética apenas para a amostra sem FSS, sendo que as amostras com FSS devido à sua natureza não homogênea, não se adequa ao escopo do método NRW.

A fórmula para calcular a permissividade elétrica (ϵ) e a permeabilidade magnética (μ) utilizando o método de Nicholson-Ross-Weir (NRW) é baseada nos parâmetros de espalhamento S_{ij} . O modelo NRW permite calcular a parcela real ($\epsilon' \mu'$) imaginária ($\epsilon'' \mu''$) que pode ser descrita de acordo com as propriedades de permissividade elétrica e permeabilidade magnética conforme as equações (1)(2).

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (\text{Equação 1})$$

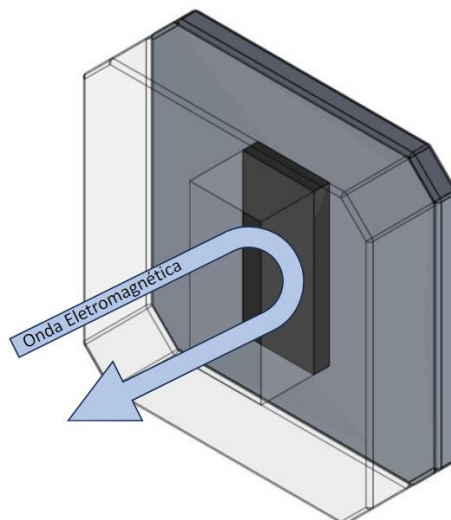
$$\mu = \mu' - j\mu'' \quad (\text{Equação 2})$$

3.3. Ensaio de Refletividade

O ensaio de refletividade, também conhecido como teste de perda por reflexão ou como conhecido em inglês Reflection Loss (RL), é um procedimento utilizado para avaliar a capacidade de um material em absorver a radiação eletromagnética incidente em uma determinada faixa de frequência. Durante o ensaio, uma amostra do material em teste é exposta a ondas eletromagnéticas de uma fonte externa, como um radar ou um analisador de rede vetorial. A quantidade de radiação eletromagnética refletida pela amostra é então medida e comparada com a quantidade de radiação incidente (Chen et al., 2019).

A perda por reflexão é expressa em decibéis (dB) e representa a diferença entre a potência da radiação incidente e a potência refletida. Quanto maior for a perda, mais eficiente é o material em absorver a radiação, o que é desejável em diversas aplicações, como na redução de interferências eletromagnéticas ou na camuflagem de objetos contra radares. O ensaio de refletividade é fundamental para caracterizar materiais absorvedores e avaliar sua adequação para diferentes fins.

Figura 2 - Representação esquemática do ensaio de refletividade utilizando um guia de onda.



Fonte: Produção do autor.

3.4. Superfícies Seletoras de Frequência (FSS)

As FSSs são estruturas projetadas para controlar o comportamento das ondas eletromagnéticas em uma determinada faixa de frequência. Elas são compostas por padrões periódicos, que interagem com as ondas eletromagnéticas de forma seletiva, permitindo a passagem de determinadas frequências enquanto bloqueiam outras.

A influência das FSSs no ensaio de refletividade é significativa, pois essas estruturas podem ser projetadas para direcionar a absorção ou a reflexão da radiação eletromagnética em diferentes frequências. Quando uma amostra com FSS é submetida ao ensaio de refletividade, a presença dessas estruturas pode modificar o padrão de reflexão das ondas incidentes, resultando em uma perda por reflexão diferente daquela observada em uma amostra sem FSS.

Em outras palavras, elas podem ser projetadas para aumentar ou diminuir a perda por reflexão em determinadas frequências, dependendo do objetivo do projeto. Isso permite o desenvolvimento de materiais absorvedores de radiação eletromagnética com características específicas, adaptadas para aplicações em diversas áreas.

As FSSs desempenham um papel fundamental na criação de metamateriais. Esses materiais artificiais possuem propriedades eletromagnéticas incomuns que não são encontradas na natureza. Ao manipular cuidadosamente a estrutura e o arranjo das FSSs, é possível criar materiais com características extraordinárias, como índices de refração negativos, que podem dobrar a luz em direções inesperadas, ou absorvedores de luz capazes de capturar e dissipar energia eletromagnética de maneira altamente eficiente.

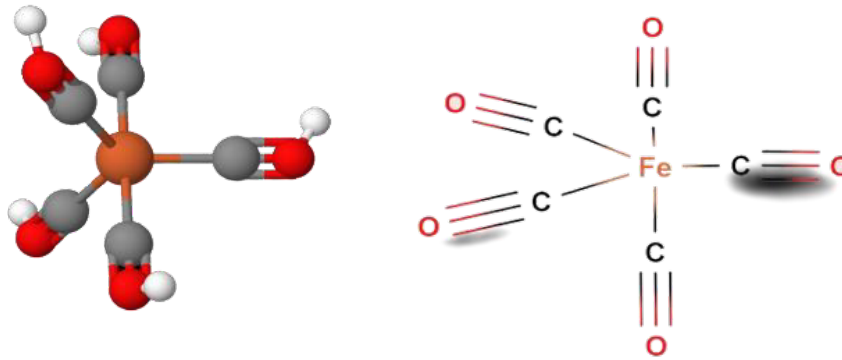
Portanto, as FSSs não apenas influenciam diretamente o comportamento das ondas eletromagnéticas, mas também são fundamentais na criação de materiais avançados e inovadores, como os metamateriais, que têm aplicações revolucionárias em várias áreas da ciência e da tecnologia.

3.5. Materiais utilizados

3.5.1. Aditivo Magnético

A Ferrocenona (FC) é derivada da decomposição térmica do Pentacarbonil de ferro, exibindo uma estrutura semelhante à Figura x. Este material contém predominantemente ferro em sua composição total, representando cerca de 96% em peso. Devido a essas características, a FC exibe propriedades magnéticas, sendo amplamente empregada na indústria como componente essencial em dispositivos eletrônicos.

Figura 3 - Representação da estrutura da ferropentacarbonila



A Ferrocarbonila tem despertado interesse nas aplicações eletrônicas, especialmente em núcleos de bobinas de alta frequência. Sua obtenção ocorre pela decomposição da ferro-pentacarbonila, um composto que possui um átomo de ferro ligado a cinco grupos carbonila. O ferro, representando cerca de 96% da massa do material, é responsável pela geração dos momentos magnéticos na ferrocarbonila. A natureza magnética do material pode variar entre mole e duro, dependendo do processo de síntese. Neste estudo, foi utilizada a ferrocarbonila de caráter magnético mole, obtida em uma atmosfera de hidrogênio com a presença de N, C e O. Esses elementos reduzem a resistência mecânica, aumentando, assim, a permeabilidade e a capacidade de magnetização do material. O processo de síntese da ferrocarbonila empregada é ilustrado na Figura 4.

Figura 4 - Processo de purificação da Ferro-pentacarbonila.



A ferrocarbonila é predominantemente formada por ferro na configuração Ferro- α , juntamente com áreas dielétricas de Fe_xN e Fe_xC . Isso resulta na estrutura cristalina principal sendo a cúbica de corpo centrado, como ilustrado na Figura 4 (Gama, 2006).

3.5.2. Matriz Dielétrica

O polidimetilsiloxano (PDMS), popularmente conhecido como borracha de silicone, foi escolhido como matriz dielétrica do material devido às suas propriedades físicas e químicas favoráveis. O PDMS é um polímero flexível, resistente à temperatura, impermeável e biocompatível, o que o torna adequado para uma variedade de aplicações (Lopes, 2020). Sua maleabilidade permite a fácil moldagem em diferentes formas e tamanhos, enquanto sua estabilidade dimensional garante uma consistência estrutural ao longo do tempo. Além disso, o PDMS possui uma alta resistência elétrica e dielétrica, tornando-o ideal como isolante em aplicações que requerem baixa condutividade elétrica. Essas características fazem dele uma escolha conveniente e versátil como matriz, oferecendo tanto propriedades mecânicas quanto elétricas desejáveis para o desempenho do material.

4. METODOLOGIA

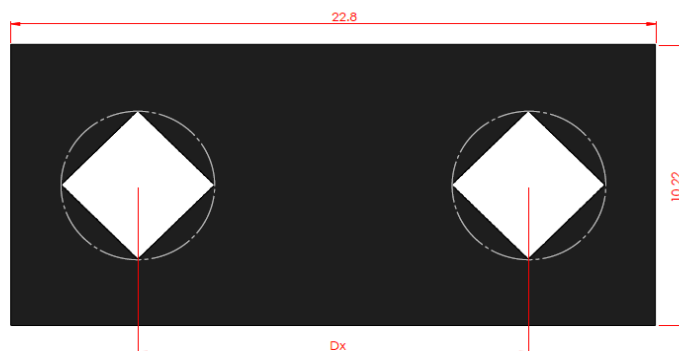
Este estudo foi estruturado em quatro fases a fim de otimizar a eficiência de tempo e organização

- Elaboração dos moldes para os quatro formatos de FSS.
- Produção das amostras.
- Caracterização das propriedades eletromagnéticas das amostras sem FSS, utilizando o método matemático Nicholson-Ross-Weir (NRW), Parâmetro S (ART) e Reflection Loss.
- Simulação de diversas geometrias para a otimização do potencial de atenuação, com base nos resultados mais promissores.

4.1. Elaboração dos moldes

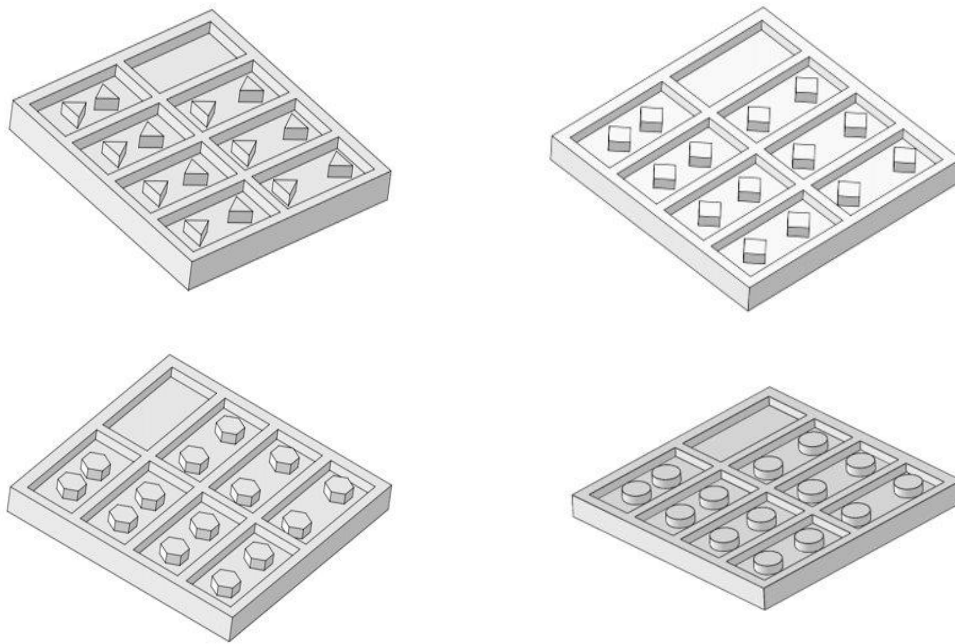
Os moldes empregados na produção das amostras foram concebidos utilizando software de Desenho Assistido por Computador (CAD), com dimensões determinadas pelo offset para a banda X, apresentando medidas de 22,8 mm x 10,22 mm e espessura de 2,2 mm. Foram elaborados quatro moldes distintos, cada um adotando um formato de FSS diferente, nomeadamente triangular, losangular, hexagonal e circular. Cada molde tem a capacidade de acomodar oito amostras, consistindo em uma amostra sem FSS e sete variações de distância dos centros das FSS, denominadas como D_x .

Figura 5 - Medidas gerais das amostras e D_x



Fonte: Produção do autor.

Figura 6 - Imagem dos moldes desenvolvidos em CAD.



Fonte: Produção do autor.

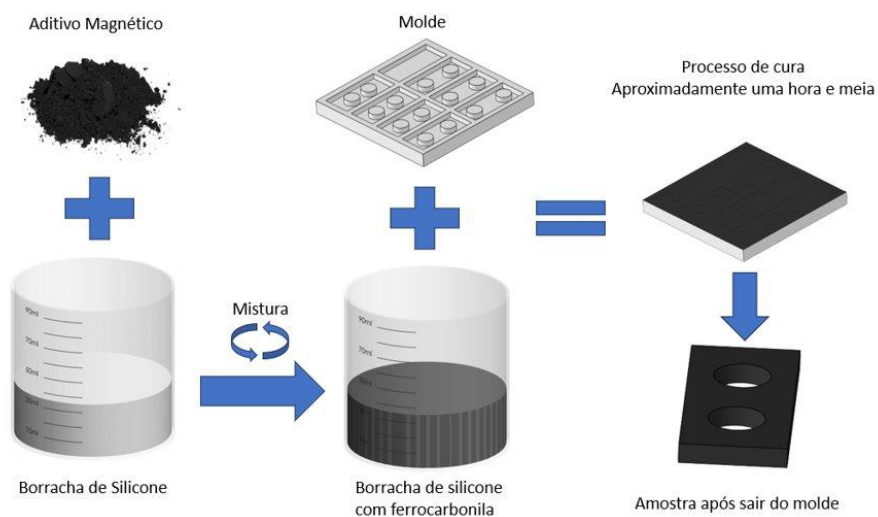
4.2. Fabricação das Amostras

Os materiais selecionados para a fabricação das amostras foram cuidadosamente escolhidos visando atender às exigências específicas do projeto. Entre esses materiais, destacam-se o particulado de Ferro Carbonila, fornecido pela BASF, e o polidimetilsiloxano (PDMS), mais conhecido como borracha de silicone, fornecido pela Redelease. A BASF forneceu o particulado de Ferro Carbonila, um aditivo magnético essencial para conferir as propriedades desejadas de absorção eletromagnética às amostras. Por sua vez, a Redelease disponibilizou o PDMS, que serve como matriz para a composição das amostras, garantindo uma base estável e flexível para a integração do aditivo magnético.

Durante o processo de preparação das amostras, foi necessário seguir uma série de etapas detalhadas para garantir a qualidade e a precisão dos resultados. Inicialmente, realizou-se a mistura do aditivo magnético com a matriz de PDMS em proporções cuidadosamente calculadas. Para essa tarefa, utilizou-se uma

balança analítica de alta precisão, modelo FA-2204 da empresa SCALE, que permitiu uma medição precisa e confiável dos componentes. Após a completa homogeneização da mistura, o catalisador foi adicionado para iniciar o processo de cura.

Figura 7 - Representação da estrutura da ferrocarbonila.



Fonte: Produção do autor.

Figura 8 - Amostras com FSS em diferentes formatos.

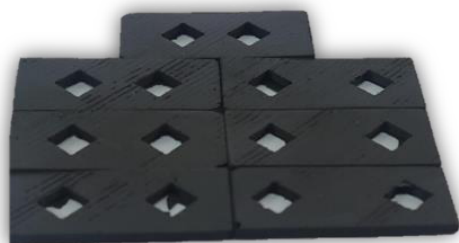
(a) Formato circular



(b) Formato hexagonal



(c) Formato losangular



(d) Formato triangular



Fonte: Produção do autor.

4.3. Proporções

O estudo foi conduzido com o objetivo de analisar a influência das FSS em função de diferentes formatos, mantendo constante a proporção entre as amostras. As proporções adotadas estão representadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Proporções utilizadas.

Silicone	Ferrocbonila	Catalisador
30%	70%	5%

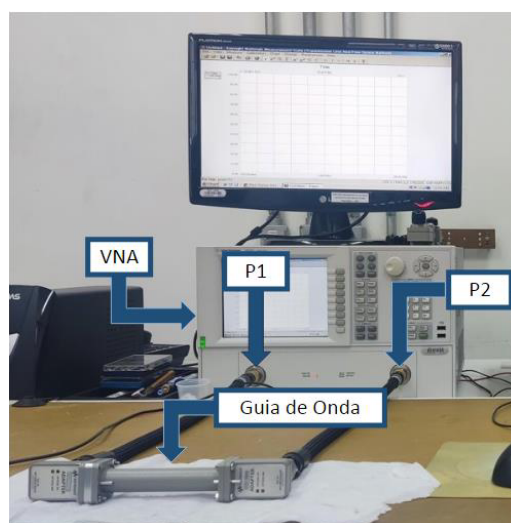
4.4. Obtenção dos resultados

Após a etapa de fabricação das amostras, iniciou-se a fase de análise utilizando um Analisador de Rede Vetorial (VNA), popularmente conhecido como Vector Network Analyzer. Este instrumento foi empregado para coletar dados relativos à Permissividade Elétrica, Permeabilidade Magnética e ao Parâmetro S (Scattering) para a amostra sem FSS, enquanto para as amostras com FSS, a análise se concentrou exclusivamente na perda por reflexão (Reflection Loss).

Com base nos dados adquiridos durante a análise, foram produzidos gráficos utilizando softwares matemáticos especializados. Esses gráficos oferecem uma representação visual dos resultados, facilitando a interpretação e permitindo uma análise mais precisa das propriedades eletromagnéticas das amostras em estudo.

Todo o processo de análise foi conduzido com precisão, levando em consideração detalhadamente cada aspecto das propriedades eletromagnéticas das amostras. Essa abordagem minuciosa possibilitou uma avaliação abrangente do desempenho dos materiais, identificando pontos fortes e áreas para aprimoramento. Além disso, contribuiu de forma significativa para o avanço do conhecimento na área de materiais absorvedores de radiação eletromagnética, estimulando futuras pesquisas e inovações tecnológicas.

Figura 9 - Analisador de rede Vetorial em conjunto com guia de onda para banda X.



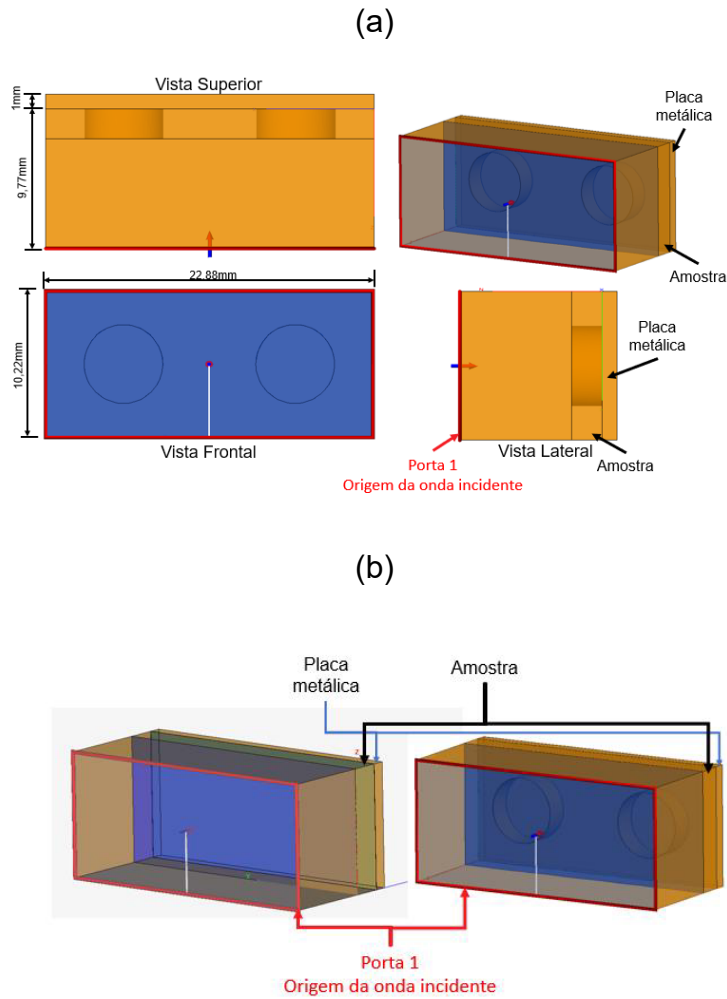
Fonte: Produção do autor.

4.5. Simulação

Para as simulações, foi utilizado o software FEKO®, com o intuito de reproduzir as medidas realizadas no sistema de guia de onda. Posteriormente foram utilizadas para determinar os possíveis resultados dos materiais em sistema de espaço livre. Dessa forma, as simulações foram divididas em duas partes, a simulação com base em guia de onda e a simulação com base em espaço livre. Em ambas as simulações foram utilizados os valores de permissividade elétrica (ϵ' , ϵ'') e permeabilidade magnética (μ' , μ'') medidos pelo método NRW no sistema de guia de onda.

O sistema de guia de onda foi montado no software FEKO reproduzindo o sistema de medida com as dimensões do guia de onda da Banda X, como pode ser observado na Figura 10. Neste sistema, foram reproduzidas as medidas com base no ensaio de refletividade, ou seja, a amostra está localizada na porta 2, com a placa metálica em contato com sua superfície posterior. O volume interno do offset, não preenchido pela amostra, foi preenchido com ar ($\epsilon' = 1$, $\epsilon'' = 0$, $\mu' = 1$ e $\mu'' = 0$).

Figura 10 - Sistema para simulações do ensaio de refletividade em guia de onda, (a) vistas do sistema e (b) sistema com amostra com e sem FSS



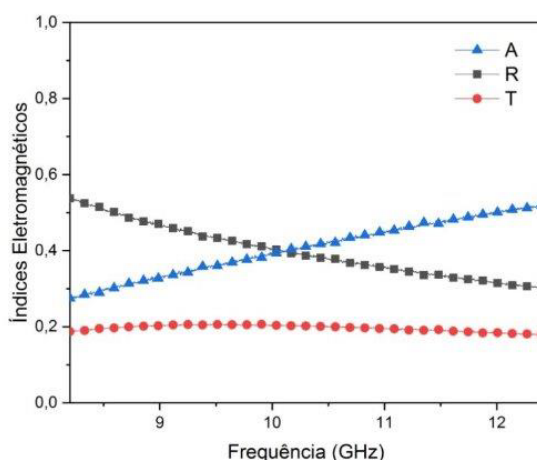
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como parâmetro de discussão foi definido a comparação da sua capacidade de perda de refletividade de acordo com a forma geométrica implementada na FSS e sua variação de acordo com o espaçamento dos centros também denominado D_x . Para melhor compreensão foi dada como base para comparação uma amostra sem FSS, com o objetivo de mostrar a eficácia e a influência da FSS no material.

5.1. Índices de absorbância, transmitância e refletância

Determinando o índice eletromagnético das amostras, conforme Figura 11, em que todas possuem massa de 70% de ferrocenona, é possível analisar que enquanto a absorbância aumenta de 29% para 51%, a refletância diminui, caindo de 54% para 29%. Já a transmitância, permanece próximo a 19% durante toda a banda.

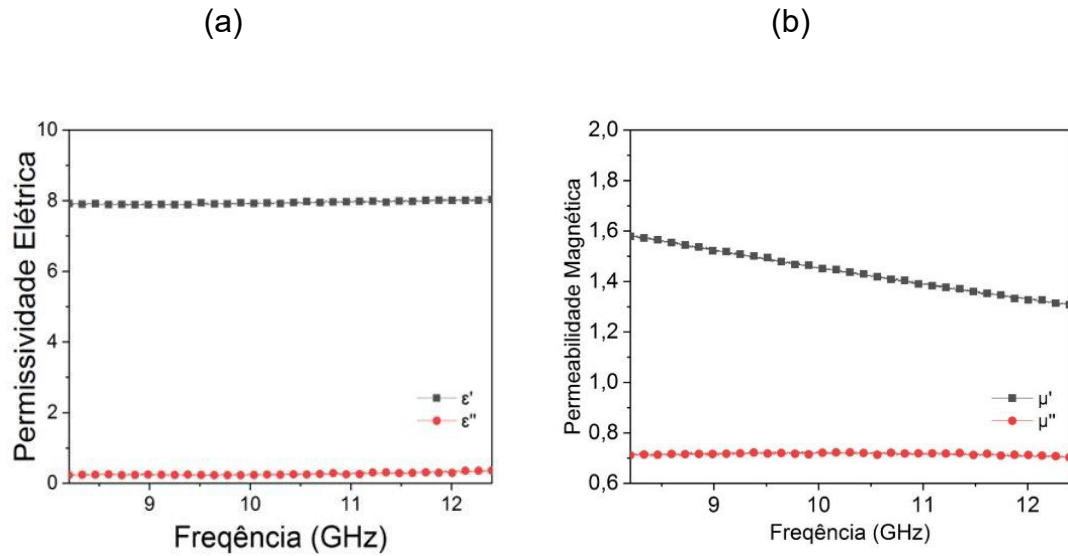
Figura 11 - Relação dos índices de espalhamento e faixa de frequência.



5.2. Propriedades eletromagnéticas

Os resultados da caracterização eletromagnética das amostras com 70% de ferrocenona demonstram o valor médio ao longo da Banda X de 8 para a parcela real da permissividade, e o valor médio de 0,03 para a parcela imaginária, conforme Figura 12 (a). Este resultado demonstra que o material possui um comportamento elétrico relevante em relação ao silicone puro que possui o valor de $\epsilon' = 3$ (Lopes,2020). O comportamento magnético dos compósitos pode ser observado na Figura 12 (b), demonstrando um valor de μ' em 1,6 em 8,2 GHz com uma redução conforme aumento da frequência alcançando o valor de 1,3 em 12,4 GHz. O valor de μ'' ao longo da Banda X foi de 0,7, demonstrando um potencial de dissipação magnético do material maior que o potencial de dissipação elétrica, o que sugere que os fenômenos de atenuação do material possuem predominantemente caráter magnético.

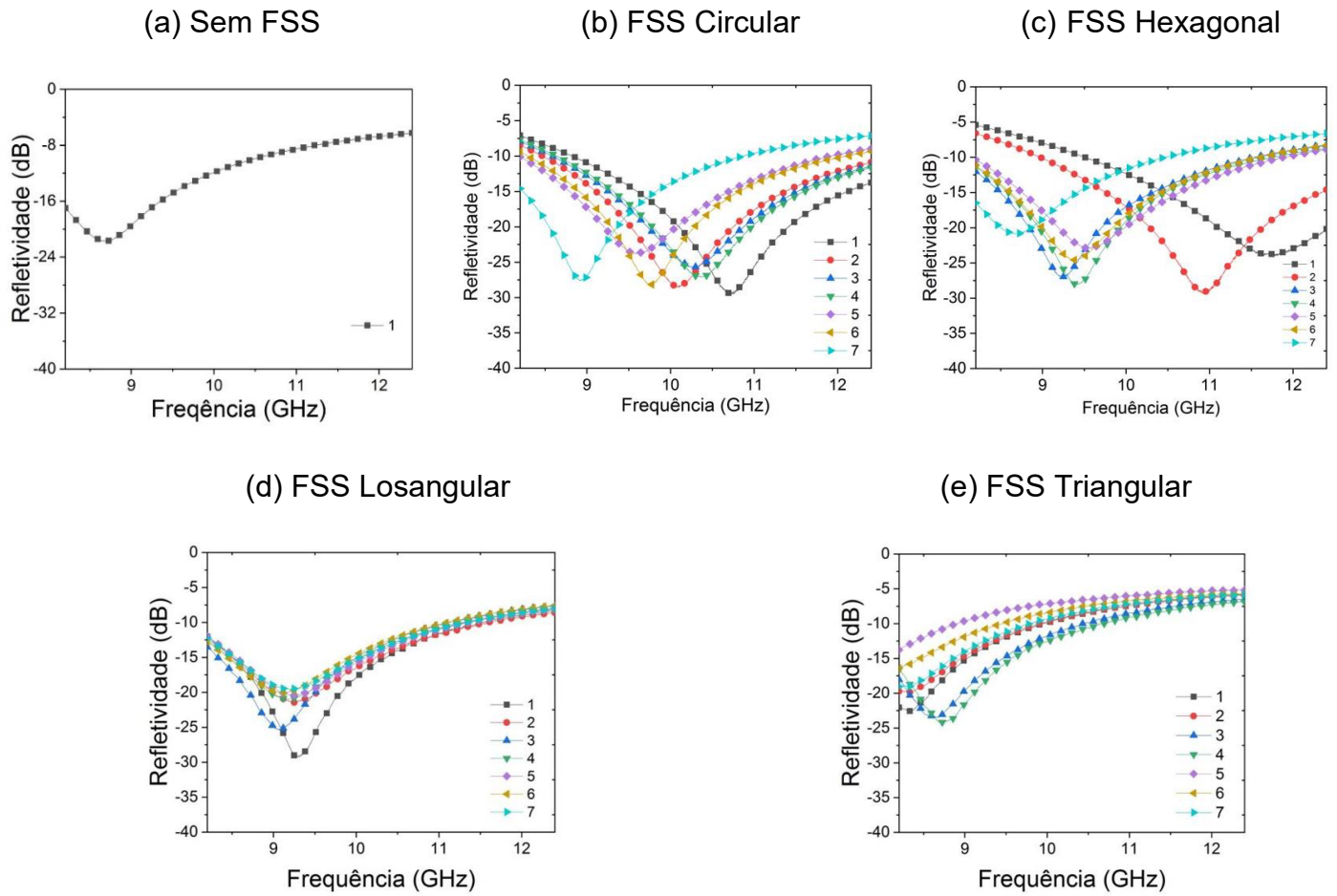
Figura 12 - Resultado de Permissividade Elétrica e Permeabilidade Magnética da Amostra sem FSS.



5.3. Ensaio de refletividade

Com base nos gráficos acima, é possível perceber que a maior parte dos picos de refletividade estão situados entre 8 e 10 GHz de frequência, e que a maioria dos resultados alcançou um resultado menor que -25 dB. Todas as amostras permaneceram abaixo de -5 dB, e a maioria conseguiu ter grande parte do espectro da frequência menor que -10 dB, exceto por alguns resultados das amostras de FSS triangular.

Figura 13 - Resultado das Análises de Reflection Loss de diferentes amostras



Analisando a continuidade e o padrão entre resultados de mesma FSS, observamos que as amostras de FSS losangular e triangular se destacam por não se dispersarem tanto quanto as amostras de FSS circular e hexagonal. Na Tabela 2 está representada os melhores resultados obtidos, considerando não apenas a menor refletividade, mas a continuidade abaixo de -10 dB também.

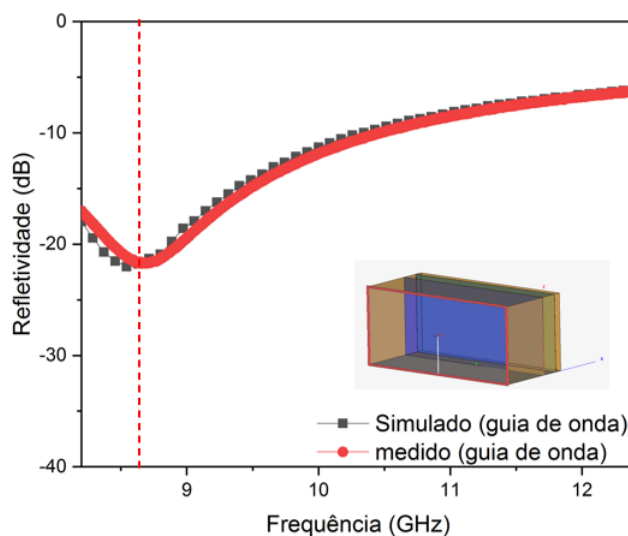
Tabela 2 - Melhores resultados de cada formato de FSS

Formato da FSS	Dx (mm)	Frequência (GHz)	RL (dB)	%
Circular	6	9,7	-28	99,84
Hexagonal	4	9,4	-27,5	99,82
Losangular	1	9,3	-29	99,87
Triangular	4	8,7	-24,5	99,64
Sem FSS	1	8,6	-22	99,36

5.4. Simulação

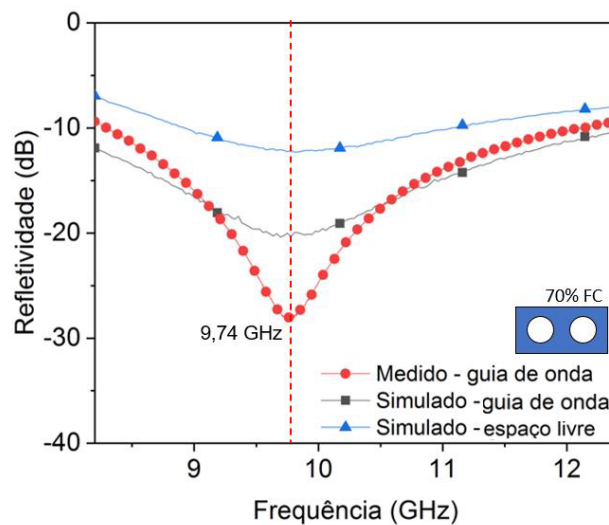
O potencial de atenuação da amostra com concentração de 70% foi simulado, com sistema de guia de onda, e comparado com os resultados medidos, conforme **Erro! Fonte de referência não encontrada..** Conforme os resultados indicam, a simulação com este sistema está coerente com o sistema medido devido a pouca diferença entres os dados. Este fato, corrobora com a validação da metodologia e dos valores das propriedades utilizadas para a simulação. Assim, é possível utilizar o mesmo sistema, de guia de onda, e valores das propriedades (ϵ' , ϵ'' , μ' , μ'') montado no software para simular o potencial de atenuação das amostras com FSS. Vale destacar que a permissividade e permeabilidade magnética das amostras com FSS não podem ser mensuradas no guia de onda pelo método NRW pois são estruturas não homogêneas (BAKER-JARVIS, 1990).

Figura 14 - Potencial de atenuação da amostra de 70% FC sem FSS, dados simulados e medidos.



Os sistemas em guia de onda e espaço livre com a amostra com FSS foram montados com base nas geometrias que apresentaram os melhores resultados de atenuação. Os resultados simulados e medidos estão apresentados na Figura 13. Com base nos resultados, é possível destacar que os valores simulados apresentaram picos de atenuação na mesma frequência que os medidos, contudo ocorreu variações em intensidade dependendo do sistema sendo guia de onda ou espaço livre.

Figura 15 - Potencial de atenuação da amostra de 70% FC com FSS circular



6. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos demonstraram um desempenho notável na atenuação de radiação eletromagnética na aplicação das FSSs de formato circular, com uma refletividade de -28 dB na frequência de 9,7 GHz e um Dx de 6 mm. Além de manter todos os picos de perda de refletividade abaixo de -20 dB e sendo bem distribuída ao longo da faixa de frequência, de acordo com Dx. Os resultados obtidos representam um avanço significativo na pesquisa de materiais compósitos, demonstrando a influência e a melhora de seus resultados quando aplicado as superfícies seletoras de frequência. A incorporação desses padrões em materiais compósitos demonstrou-se altamente eficaz na eliminação de radiação eletromagnética. Os resultados promissores, aqui apresentados, têm o potencial de impactar positivamente diversas indústrias e aplicações onde a

absorção de radiação eletromagnética desempenha um papel fundamental, além de apresentar um menor custo devido a utilização dos padrões. Essa pesquisa abre caminho para a aplicação prática desses materiais inovadores e pode contribuir para melhorar significativamente diversas áreas tecnológicas e industriais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BAKER-JARVIS, James. Transmission/reflection and short-circuit line permittivity measurements. NASA STI/Recon Technical Report N 91, , p. 28482, 1990.
- Chen, H., Shen, R., Han, L., Zhou, Y., Li, F., Lu, H., Weng, X., Xie, J., Li, X., & Deng, L. (2019). Closed-form representation for equivalent electromagnetic parameters of biaxial anisotropic honeycomb absorbing materials. *Materials Research Express*, 6(8), 085804. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab2020>
- DING, Zhipeng et al. An ultra-wideband magnetic composite metamaterial microwave absorber embedded with multilayered graphene FSS. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, p. 172268, 2024.
- Gama, A. M. (2006). *Desenvolvimento de materiais absorvedores de radiação eletromagnética à base de ferro carbonila e silicone* Andreza de Moura e Mirabel Cerqueira Rezende.
- HAN, Yun et al. Design of morphology-controlled cobalt-based spinel oxides for efficient X-band microwave absorption. **Materials Research Bulletin**, v. 172, p. 112670, 2024.
- HUANG, Bo et al. Thin and ultra-broadband electromagnetic absorption carbonyl iron-based metamaterial via multiscale synergic dielectric-magnetic design. **Composites Science and Technology**, v. 250, p. 110509, 2024.
- KANNA, R. Rajesh et al. Microwave-absorbing behavior of rare-earth-ion-doped copper manganese nanoferrites in X-band frequency. **Ceramics International**, 2024.
- LAN, Di et al. Perspective of electromagnetic wave absorbing materials with continuously tunable effective absorption frequency bands. **Composites Communications**, p. 101993, 2024.
- Liu, Y., Yang, J., Xu, J., Lu, L., & Su, X. (2022). Electromagnetic and microwave absorption properties of Ti₃SiC₂/AgNWs/ acrylic acid resin composite coatings with FSS incorporation. *Journal of Alloys and Compounds*, 899, 163327. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.163327>
- LIU, Yi et al. Electromagnetic and microwave absorption properties of flexible fabric coatings containing Ag decorated spherical graphene powders with

FSS incorporation. **Ceramics International**, v. 50, n. 7, p. 11075-11084, 2024.

Lopes, B. H. K. (2020). *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)* [Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais]. <http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/424FS3L>

MANOKARAN, Singaram et al. An Ultrathin FSS Absorber for X-Band Applications. In: **2024 Ninth International Conference on Science Technology Engineering and Mathematics (ICONSTEM)**. IEEE, 2024. p. 1-6.

Plyushch, A., Zhai, T., Xia, H., Santillo, C., Verdolotti, L., Lavorgna, M., & Kuzhir, P. (2019). Ultra-Light Reduced Graphene Oxide Based Aerogel/Foam Absorber of Microwave Radiation. *Materials*, 12(2), 213. <https://doi.org/10.3390/ma12020213>

QIAO, Jing et al. The vital application of rare earth for future high-performance electromagnetic wave absorption materials: A review. **Journal of Materials Science & Technology**, v. 176, p. 188-203, 2024.

QU, Ning et al. 2D/2D coupled MOF/Fe composite metamaterials enable robust ultra-broadband microwave absorption. **Nature Communications**, v. 15, n. 1, p. 5642, 2024.

XIONG, Xuhui et al. Recent progress in carbon-based materials and loss mechanisms for electromagnetic wave absorption. **Carbon**, p. 118834, 2024.

ZHANG, Yan et al. Multifunctional electromagnetic wave absorbing carbon fiber/Ti3C2TX MXene fabric with ultra-wide absorption band. **Carbon**, p. 119594, 2024.

Zhao, Y., Hao, L., Zhang, X., Tan, S., Li, H., Zheng, J., & Ji, G. (2022). A Novel Strategy in Electromagnetic Wave Absorbing and Shielding Materials Design: Multi-Responsive Field Effect. *Small Science*, 2(2). <https://doi.org/10.1002/smssc.202100077>

ZHOU, Mengyu et al. Ultra-Thin and Broadband P-Band Metamaterial Absorber Based on Carbonyl Iron Powder Composites. **Materials**, v. 17, n. 5, p. 1157, 2024.