



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

**ESTUDO DE COMPÓSITOS CERÂMICOS PARA APLICAÇÃO COMO
MATERIAIS ABSORVEDORES DE RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA
(MARE) NA FAIXA DE FREQUÊNCIA DE MICRO-ONDAS**

Júlia Maria de Oliveira Gadbem

Relatório de Iniciação Científica do
programa PIBIC, orientada pelos
pesquisadores Dr. Sergio Luiz Mineiro
e Newton Adriano dos Santos Gomes.

INPE
São José dos Campos
2024



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

**ESTUDO DE COMPÓSITOS CERÂMICOS PARA APLICAÇÃO COMO
MATERIAIS ABSORVEDORES DE RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA
(MARE) NA FAIXA DE FREQUÊNCIA DE MICRO-ONDAS**

Júlia Maria de Oliveira Gadbem

Relatório de Iniciação Científica do
programa PIBIC, orientada pelos
pesquisadores Dr. Sergio Luiz Mineiro
e Newton Adriano dos Santos Gomes.

INPE
São José dos Campos

2024

III

RESUMO

Os materiais absorvedores de radiação eletromagnética (MARE) têm se tornado cada vez mais relevantes devido ao avanço tecnológico nos sistemas de telecomunicações, que resultam em alta poluição eletromagnética devido à presença excessiva de campos eletromagnéticos. Esses materiais são projetados para absorver ou atenuar a energia da radiação eletromagnética que os atravessa e são geralmente constituídos por uma matriz polimérica com partículas dispersas de materiais que apresentam alta perda dielétrica e/ou magnética. Este projeto foca na investigação de compósitos cerâmicos como potenciais MARE na faixa de frequência de micro-ondas. O carbeto de silício (SiC) é considerado um material promissor para essa aplicação, pois além de suas propriedades absorventes, oferece alta resistência mecânica, estabilidade térmica e resistência à corrosão. Para complementar as propriedades do SiC, o níquel em pó é introduzido nos compósitos devido às suas características magnéticas favoráveis. O níquel é conhecido por sua elevada tangente de perdas magnéticas, tornando-o eficaz na absorção de radiação em frequências de micro-ondas. A metodologia deste estudo envolve a fabricação de amostras com 7 mm de espessura, contendo 40% de concentração de SiC disperso em matriz de silicone, variando a concentração de níquel em cada uma delas. A combinação das propriedades físicas e químicas desses materiais visa maximizar a eficiência de absorção do compósito, especialmente nas frequências centrais da banda X de frequência (8,2 - 12,4 GHz). A caracterização detalhada das propriedades eletromagnéticas das amostras é realizada utilizando um analisador de redes vetorial (VNA) acoplado a um guia de onda retangular na banda X, obtendo valores para a permissividade elétrica e permeabilidade magnética, bem como a refletividade (Reflection Loss - RL) do material. O resultado principal oriundo desta pesquisa é estabelecer os parâmetros que indiquem o potencial da utilização combinada do SiC e do níquel para a aplicação de um MARE eficiente na faixa de frequência de micro-ondas, demonstrando alta absorção da radiação incidente.

Palavras-chave: MARE, carbeto de silício, níquel, refletividade, banda X.

ABSTRACT

Radar Absorbing Materials (RAM) have become increasingly relevant due to technological advancements in telecommunications systems, which lead to high levels of electromagnetic pollution from the excessive presence of electromagnetic fields. These materials are designed to absorb or attenuate the energy of electromagnetic radiation passing through them and are typically composed of a polymer matrix with dispersed particles of materials that exhibit high dielectric and/or magnetic loss. This project investigates ceramic composites as potential RAMs in the microwave frequency range. Silicon carbide (SiC) is considered a promising material for this application, as it possesses absorbing properties and offers high mechanical strength, thermal stability, and corrosion resistance. To enhance the properties of SiC, nickel powder is introduced into the composites due to its favorable magnetic characteristics. Nickel is known for its high magnetic loss tangent, effectively absorbing radiation in microwave frequencies. The methodology of this study involves the fabrication of 7 mm thick samples containing a 40% concentration of SiC dispersed in a silicone matrix, with varying concentrations of nickel in each sample. The combination of the physical and chemical properties of these materials aims to maximize the absorption efficiency of the composite, particularly at the central frequencies of the X-band (8.2 - 12.4 GHz). Detailed characterization of the electromagnetic properties of the samples is performed using a vector network analyzer (VNA) coupled to a rectangular waveguide in the X-band, obtaining values for the electric permittivity, magnetic permeability, and the material's reflection loss (RL). The main outcome of this research is to establish the parameters that indicate the potential of the combined use of SiC and nickel for an efficient RAM application in the microwave frequency range, demonstrating high absorption of incident radiation.

Keywords: RAM, silicon carbide, nickel, reflection loss, X-band.

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2.1 - (a) Tetraedros elementares do SiC, (b) projeção dos átomos de silício na estrutura cúbica e (c) projeção dos átomos de silício na estrutura hexagonal	5
Figura 2.2 - Estruturas cristalinas α e β do SiC	6
Figura 2.3 - Representação da reflexão e transmissão em um dispositivo de duas portas	10
Figura 2.4. Setup de medição da refletividade empregando um porta amostra pelo método do guia de onda.....	12
Figura 3.1 - Modelo 3D do molde produzido.....	13
Figura 3.2. Moldes de PLA produzidos por manufatura aditiva.....	14
Figura 3.3. Becker contendo matriz de silicone aditivada com SiC e Ni, sendo pesados por uma balança de precisão.....	15
Figura 3.4. Amostras preparadas.....	15
Figura 4.1. Gráficos referentes à (a) ϵ'_r e (b) tangente de perda dielétrica das amostras.....	18
Figura 4.2. Gráficos referentes à (a) μ'_r e (b) tangente de perda magnética das amostras.....	19
Figura 4.3. Gráficos referentes à (a) refletância, (b) transmitância e (c) absorção das amostras.....	21

Figura 4.4. Gráfico referente aos valores de refletância, transmitância e absorção das amostras baseados no aumento na concentração de níquel.....22

Figura 4.5. Gráficos referentes à (a) refletância, (b) transmitância e (c) absorção das amostras contendo apenas silicone + Ni.....24

LISTA DE TABELAS

	Pág.
Tabela 3.1. Concentração de silicone, SiC, níquel e catalisador de cada uma das amostras, massa de cada um dos itens e espessura final das amostras.....	16
Tabela 3.2. Relação entre a refletividade do material e o percentual de energia absorvida.....	17

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CNPQ - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

COPDT - Coordenação de Pesquisa Aplicada e Desenvolvimento Tecnológico

INPE - Instituto nacional de pesquisas espaciais

MARE - Materiais absorvedores de radiação eletromagnética

Ni - Níquel

RL - Reflection loss

SiC - Carbetto de silício

VNA - Analisador de redes vetorial

SUMÁRIO

	Pág.
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos.....	3
2. REVISÃO DA LITERATURA	4
2.1 Carbetto de silício	4
2.2 Níquel.....	6
2.3 Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética	7
2.4 Propriedades eletromagnéticas de um material.....	8
2.5 Parâmetros de espalhamento	9
2.6 Refletividade	11
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	13
3.1 Produção das amostras de silicone e SiC	13
3.2 Caracterização eletromagnética	17
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	18
5. CONCLUSÃO	27
REFERÊNCIAS	28

1. INTRODUÇÃO

A rápida evolução da tecnologia em sistemas de telecomunicações tem proporcionado o desenvolvimento de sistemas cada vez mais ágeis e eficientes, disponibilizando uma melhor qualidade de serviços entre usuários ao longo dos anos. No entanto, o crescente uso de dispositivos eletrônicos e sistemas de comunicação sem fio tem acarretado problemas como a poluição eletromagnética, decorrente da presença excessiva de campos eletromagnéticos no ambiente. Esse problema não apenas levanta preocupações sobre potenciais impactos futuros na saúde humana, mas também pode ocasionar interferências no funcionamento de sistemas compostos por dispositivos eletromagnéticos [1,2]. Diante desse cenário, a pesquisa de materiais que possam atenuar esses efeitos tem ganhado notável destaque. Um exemplo promissor é o crescente interesse em materiais absorvedores de radiação eletromagnética (MARE), que se apresentam como uma abordagem promissora para reduzir os efeitos da poluição eletromagnética.

Materiais absorvedores de radiação eletromagnética são materiais compósitos que são projetados para absorver ou atenuar a energia de radiação eletromagnética que incide sobre eles e, dependendo das propriedades trabalhadas, são utilizados diferentes materiais para atingir a faixa de frequência desejada. Esses materiais geralmente são desenvolvidos a partir de uma matriz polimérica acrescida de partículas de materiais dielétricos e/ou magnéticos dispersas em sua matriz, de forma a dissipar a energia absorvida em forma de calor ao absorver ondas eletromagnéticas em determinadas frequências [3].

A busca por um material absorvedor eficiente envolve a consideração de várias propriedades importantes. Um MARE adequado deve apresentar uma alta absorção na faixa de frequência desejada, além de exibir elevadas perdas dielétricas e/ou magnéticas. A espessura do MARE deve ser otimizada para maximizar sua eficiência absorvedora, evitando restrições práticas na aplicação. Além disso, a facilidade de fabricação e emprego é essencial para viabilizar sua

utilização em diversas aplicações [4]. Alguns materiais vêm sendo amplamente estudados no intuito de obter propriedades para atuarem como um MARE e, dentre eles, encontra-se o Carbetto de Silício (SiC).

O Carbetto de Silício é uma das principais cerâmicas avançadas sintéticas, sendo constituído por carbono e silício. Embora sua produção em escala industrial tenha ocorrido pela primeira vez em 1891, seu uso como material semiconductor ganhou relevância em períodos mais recentes. A estrutura do SiC é caracterizada por ligações fortemente covalentes entre os átomos de silício e carbono, o que confere boas propriedades ao material [5-7].

Dentre suas características notáveis, destacam-se a alta resistência mecânica, química e térmica, além de apresentar boa resistência a oxidação e corrosão. Tais propriedades conferem versatilidade ao material, que se reflete em seu amplo espectro de aplicações industriais e científicas [8]. No âmbito industrial, é empregado em componentes de alta performance, como rolamentos, revestimentos protetores e peças para altas temperaturas. Na área de pesquisa científica, sua aplicação é vista em dispositivos semicondutores de alta potência, como transistores de radiofrequência e diodos emissores de luz (LED) [9-11].

Além do SiC, o Níquel (Ni), um metal de transição conhecido por sua cor prateada e resistência à corrosão, também apresenta grande potencial para ser utilizado em materiais absorvedores de radiação eletromagnética, embora ainda não seja amplamente estudado nesse campo. Com suas propriedades magnéticas, como alta permeabilidade e elevadas perdas magnéticas na faixa de micro-ondas, o níquel torna-se um candidato promissor para compósitos voltados à absorção de radiação eletromagnética. Quando combinado com o SiC, que possui características dielétricas notáveis, o níquel pode contribuir para melhorar o desempenho de compósitos, otimizando a eficiência na absorção de ondas eletromagnéticas. Essa combinação entre os materiais permite o desenvolvimento de soluções inovadoras para aplicações que demandam blindagem eletromagnética e controle de interferência.

Apesar do SiC já ter sido estudado como MARE na faixa de frequência em banda X, a maioria dos estudos concentrou-se em compósitos desenvolvidos em matrizes de resina epóxi ou parafina. As pesquisas sobre a utilização da matriz de silicone e do compósito com aditivo de Ni ainda são escassas, ressaltando a carência de projetos que investiguem o comportamento desse compósito. Vale ressaltar que o silicone apresenta vantagens importantes, como um custo mais acessível e uma maior praticidade de manipulação em comparação com outras matrizes mencionadas. Conseqüentemente, a exploração da aplicabilidade do compósito formado por silicone, SiC e Ni como MARE assume um significado crescente, dado o conjunto de suas propriedades e a vasta gama de aplicações que podem abranger na esfera industrial e na pesquisa.

1.1 Objetivos

O projeto tem como objetivo estudar as propriedades físicas e químicas de compósitos cerâmicos e sua aplicação como materiais absorvedores de radiação eletromagnética na faixa de frequência de micro-ondas. O presente relatório apresenta especificamente as análises da junção do carbeto de silício com o níquel dispersos em matriz de borracha de silicone e sua utilização como um MARE na banda X de frequência (8,2 GHz a 12,4 GHz).

As caracterizações eletromagnéticas são apresentadas aqui através da utilização de um Analisador de Redes Vetorial (VNA).

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Carbeto de silício

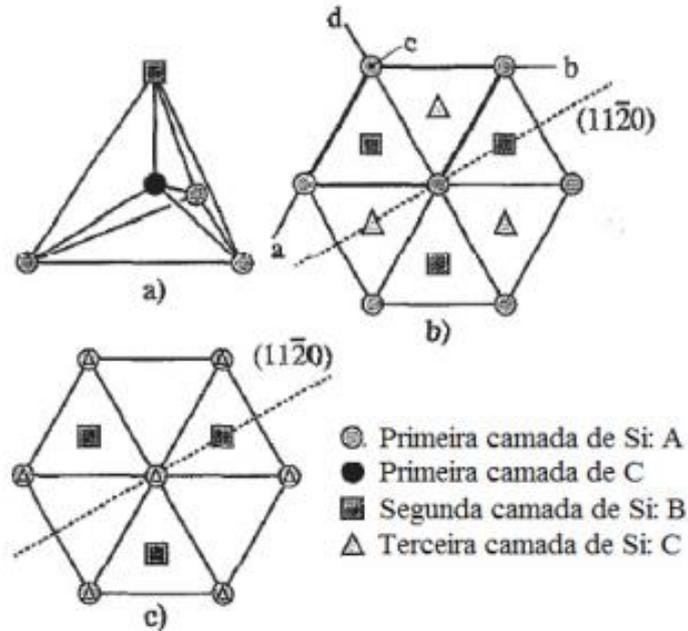
O Carbeto de Silício é uma cerâmica avançada sintética que pode ser produzida em laboratório por meio da ligação química entre átomos de carbono

e silício. Sendo um material sintético, o SiC pode ser fabricado em larga escala, e apresenta notáveis propriedades químicas e mecânicas [12].

Este material foi inicialmente descoberto de forma acidental pelo químico Jöns Jacob Berzelius em 1823, durante a realização de experimentos com o objetivo de sintetizar amostras de diamante. No entanto, somente em 1891, esse material passou a ser produzido em escala industrial. Foi nesse período que o pesquisador Edward Goodrich Acheson, enquanto conduzia experimentos para produzir um material abrasivo, encontrou cristais contendo sílica (SiO_2) e carbono (C) com o mesmo número de moléculas. A partir desse momento, a produção industrial do Carbeto de Silício foi estabelecida, e o material passou a ser amplamente estudado e aplicado em diversas áreas [13].

A molécula básica fundamental do carbeto de silício é formada pela ligação covalente entre um átomo de carbono (C) ligado em quatro átomos de silício (Si), apresentando, assim, uma estrutura tetraédrica. Além disso, o SiC apresenta politipismo, característica que permite que o material cristalize principalmente em em três diferentes configurações: cúbica, hexagonal e romboédrica, Figura 2.1 [14-16].

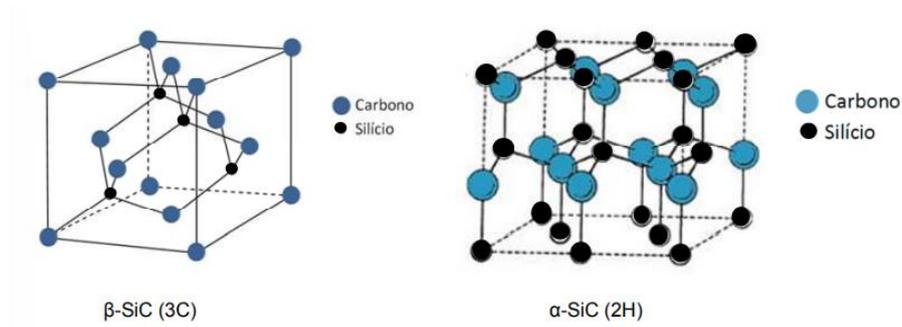
Figura 2.1. (a) Tetraedros elementares do SiC, (b) projeção dos átomos de silício na estrutura cúbica e (c) projeção dos átomos de silício na estrutura hexagonal.



Fonte: [17].

Os politipos de SiC são classificados em duas principais fases: O carboneto de silício beta (β -SiC) e o carboneto de silício alfa (α -SiC). O β -SiC é uma forma cristalina transitória que compreende os politipos que apresentam estrutura cúbica de face centrada. Essa fase ocorre em temperaturas inferiores a 2000°C, é considerada a fase menos estável e se apresenta mais comumente como 3C-SiC. Já o α -SiC compreende os politipos de estruturas não cúbicas, apresentando-se de forma hexagonal ou romboédrica. Essa fase ocorre em temperaturas superiores a 2000°C e se apresenta de forma mais estável termicamente quando comparada ao β -SiC [14,18,19]. As estruturas alfa e beta podem ser vistas através da representação na Figura 2.2.

Figura 2.2. Estruturas cristalinas α e β do SiC.



Fonte: [18].

2.2 Níquel

O níquel (Ni), elemento químico de número atômico 28 e massa atômica 58,69 u, é um metal de transição pertencente ao grupo 10 da tabela periódica. Ele possui notáveis propriedades físicas e químicas, sendo amplamente utilizado em ligas metálicas, baterias e catalisadores. É obtido principalmente a partir de minérios sulfetados, como a pentlandita, e lateríticos, como a garnierita, por processos pirometalúrgicos ou hidrometalúrgicos. Descoberto em 1751 pelo químico Axel Fredrik Cronstedt, o níquel tornou-se essencial na produção de ligas metálicas, especialmente no aço inoxidável, devido à sua resistência à corrosão e durabilidade [20].

Fisicamente, o níquel é um metal branco-prateado, denso e dúctil, com densidade de 8,908 g/cm³ e ponto de fusão de 1455 °C. Sua condutividade térmica é de 90,7 W/m·K e a condutividade elétrica é de 14,3 x 10⁶ S/m a 20 °C. Essas propriedades tornam o níquel útil em aplicações que exigem gestão térmica e estabilidade a altas temperaturas. Quimicamente, ele é resistente à oxidação e à corrosão em ambientes alcalinos, formando compostos em estados de oxidação variáveis, sendo o mais comum o +2 [21].

Devido à sua alta permeabilidade magnética e estabilidade química, o níquel é promissor em compósitos para absorção de radiação eletromagnética, especialmente na faixa de micro-ondas. Sua capacidade de formar domínios magnéticos que dissipam energia eletromagnética na forma de calor o torna eficaz na absorção de micro-ondas e no controle de interferência eletromagnética. Em compósitos, o níquel pode ser combinado com polímeros ou cerâmicas para melhorar a absorção, especialmente em aplicações que exigem blindagem eletromagnética e mitigação de interferência [20, 21].

2.3 Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética

Os MAREs constituem uma classe de materiais compostos desenvolvidos para interagir com a energia da radiação eletromagnética incidente, de forma a absorvê-la ou atenuá-la. A energia incidente no material é dissipada em forma de calor e essa interação é adaptada com base nos requisitos de projeto do absorvedor, o que frequentemente exige a seleção cuidadosa de materiais para abranger uma faixa de frequência predeterminada [3].

A pesquisa sobre este tipo de material tem se intensificado devido aos desafios substanciais decorrentes do avanço considerável na utilização de dispositivos eletrônicos. À medida que as tecnologias se integram na vida cotidiana das pessoas, surgem questões relacionadas à poluição eletromagnética, que são cada vez mais evidentes. Isso ocorre porque tais questões podem acarretar danos futuros à saúde humana e também contribuir para a interferência no funcionamento de sistemas e dispositivos eletromagnéticos. Como resposta a essa situação, a pesquisa sobre MAREs vem com o objetivo primordial de atenuar essas formas de interferência [1,2].

Esses materiais interagem com o campo eletromagnético de formas distintas, sendo classificados em dois tipos, os dielétricos e os magnéticos. Materiais dielétricos são materiais que possuem baixa condutividade elétrica,

oferecendo resistência à passagem de corrente. O mecanismo de dissipação desses materiais se dá pela sua interação com o campo elétrico e está diretamente relacionado com a sua permissividade elétrica (ϵ). Já os materiais magnéticos são materiais que possuem propriedades que os tornam capazes de atrair ou repelir outros materiais devido a interação dos campos nas estruturas moleculares. O mecanismo de dissipação desses materiais se dá pela sua interação com o campo magnético e está diretamente relacionado com a sua permeabilidade magnética (μ) [22-24].

2.4 Propriedades eletromagnéticas de um material

A permissividade elétrica de um material diz respeito ao grau de concatenação de um campo elétrico no meio em que se encontra, polarizando as estruturas. Já a permeabilidade magnética de um material se refere a capacidade de permitir que linhas de indução passem através dele, magnetizando a sua estrutura. Estes são parâmetros de proporcionalidade que se relacionam com as densidades de fluxo elétrico e magnético de um material e são utilizados para caracterizar o comportamento eletromagnético de determinados materiais [25,26]. As Equações 2.1 e 2.2 ditam a resposta do meio frente à aplicação de campos elétricos e magnéticos.

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} \quad (2.1)$$

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad (2.2)$$

O vetor \vec{D} representa a densidade de fluxo elétrico, \vec{E} caracteriza um campo elétrico aplicado, \vec{B} representa a densidade de fluxo magnético, \vec{H} representa o campo magnético aplicado e ϵ_0 e μ_0 representam, respectivamente, a permissividade elétrica e a permeabilidade magnética do material no vácuo. Dessa forma, podemos expressar a permissividade elétrica em termos da

permissividade elétrica relativa do material e a permeabilidade magnética por meio da permeabilidade relativa do material. Tais relações são descritas pelas Equações 2.3 e 2.4 [27].

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r \quad (2.3)$$

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad (2.4)$$

Desta forma, são expressos esses parâmetros na notação complexa por meio de suas componentes reais e imaginárias, Equação 2.5 e 2.6.

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' = \varepsilon_0 (\varepsilon_r' - j\varepsilon_r'') = \varepsilon_0 \varepsilon_r' (1 - j \tan \delta_d) \quad (2.5)$$

$$\mu = \mu' - j\mu'' = \mu_0 (\mu_r' - j\mu_r'') = \mu_0 \mu_r' (1 - j \tan \delta_m) \quad (2.6)$$

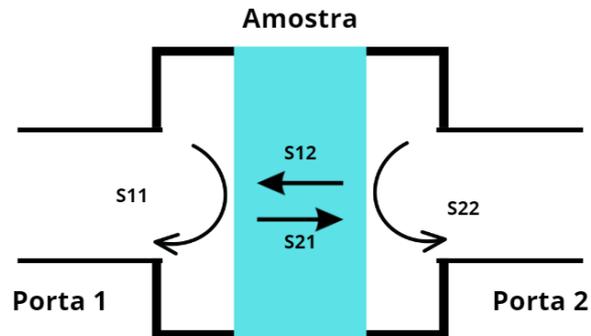
Na equação 2.5 a parte real representa o armazenamento da energia em forma de campo elétrico e a parte imaginária que corresponde a tangente de perdas dielétricas ($\tan \delta_d$) a dissipação de energia. Na equação 2.6, a parte real representa o armazenamento de energia na forma de campo magnético e a parte imaginária dado pela tangente de perdas magnéticas ($\tan \delta_m$) as dissipações do campo magnético no material [25].

2.5 Parâmetros de espalhamento

Os parâmetros de espalhamento (Parâmetros S) representam as relações de transmissão e reflexão da onda incidente sobre o material estudado. Em um sistema de duas portas, temos os parâmetros S_{11} , S_{12} , S_{21} e S_{22} , em que S_{11} representa a reflexão da onda incidente pela porta 1 e medido na porta 1, S_{22} representa a reflexão da onda incidente pela porta 2 e medido na porta 2, S_{12} representa a transmissão da onda incidida na porta 2 e medido na porta 1 e

S_{21} representa a transmissão da onda incidida na porta 1 e medido na porta 2 [28]. O esquema de transmissão e reflexão é observado na Figura 2.3.

Figura 2.3. Representação da reflexão e transmissão em um dispositivo de duas portas.



Fonte: Produção do autor.

Esses parâmetros estão diretamente relacionados à transmitância, refletância e absorção de um material ou dispositivo, ajudando a caracterizar suas propriedades eletromagnéticas.

A transmitância é a fração da energia incidente que atravessa o material sem ser refletida ou absorvida. Em termos de parâmetros S, pode ser representada pela magnitude do parâmetro S_{21} ($T = |S_{21}|^2$). Aqui, $|S_{21}|^2$ é a relação da densidade de potência transmitida em relação à densidade de potência incidente, ou seja, a fração da onda eletromagnética que passa pelo material [29].

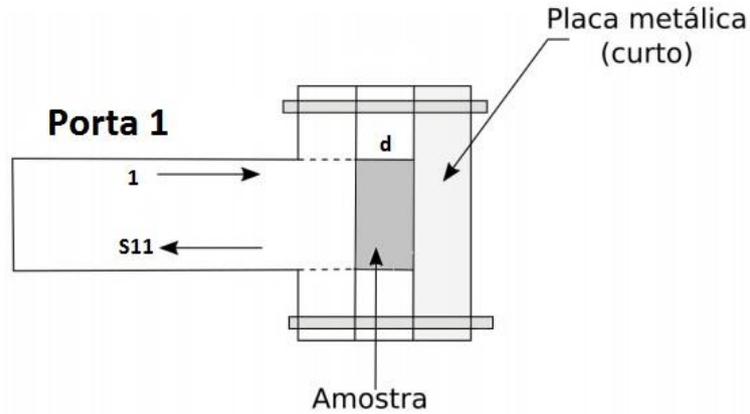
A refletância é a fração da densidade de potência incidente que é refletida de volta pelo material. Está relacionada ao parâmetro S_{11} ($R = |S_{11}|^2$). Aqui, $|S_{11}|^2$ representa a proporção da densidade de potência refletida em relação à potência incidente [29].

A absorção é a fração da densidade de potência incidente que é absorvida pelo material e convertida em outras formas de energia, como o calor. A absorção pode ser calculada indiretamente a partir da transmitância e refletância, utilizando a conservação de energia, sendo $A=1-T-R$. Ou seja, a densidade de potência que não é transmitida nem refletida é absorvida pelo material. Como os parâmetros de espalhamento medem a transmitância e refletância, a absorção pode ser deduzida analiticamente. A partir dos parâmetros de espalhamento, é possível calcular as propriedades ópticas do material, como o índice de refração complexo e as constantes dielétricas, que determinam como as ondas se propagam no material. Nos materiais absorvedores de radiação eletromagnética, o objetivo é minimizar a refletância e a transmitância, maximizando a absorção [29].

2.6 Refletividade

Uma das formas de analisar a capacidade de absorção do MARE é através dos parâmetros de refletividade. Esse método de caracterização consiste em analisar o parâmetro S_{11} do guia de ondas. Para isso, a amostra é colocada dentro do *offset* da banda desejada e este é fixado entre a porta 1 e uma placa metálica, cuja função é refletir toda a energia dissipada pela porta 1 de modo que essa retorne para a amostra que se encontra entre a placa e a porta, como mostra a Figura 2.4 [23-25, 27].

Figura 2.4. Setup de medição da refletividade empregando um porta amostra pelo método do guia de onda.



Fonte: Adaptado de [22].

A partir da leitura de resposta do parâmetro S_{11} , é constatado o quanto de energia foi absorvida ou atenuada pela amostra bem como a quantidade de energia que retornou para a porta 1, resultando assim, na refletividade (RL - *Reflection Loss*) do material. A refletividade é medida em dB conforme a Equação 2.7.

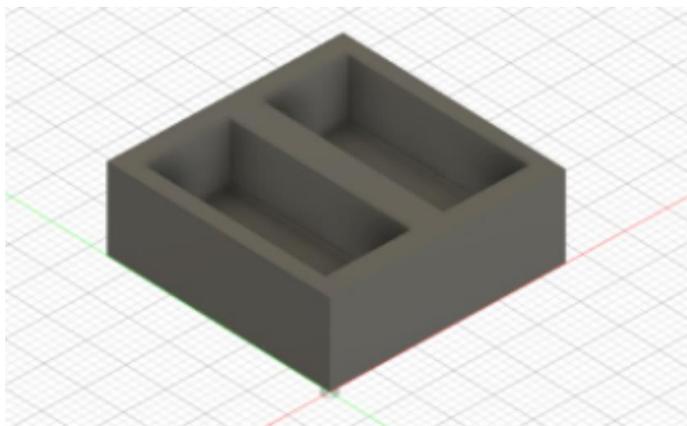
$$RL(dB) = 20\log|S_{11}| \quad (2.7)$$

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 Produção das amostras de silicone e SiC

Inicialmente, foram produzidos cinco moldes iguais de poliácido lático (PLA) por meio da técnica de manufatura aditiva (impressão 3D) e foram modelados de forma personalizada utilizando o *software* Autodesk Fusion 360®. Esses moldes possuem duas cavidades retangulares com 7 mm de profundidade cada, totalizando espaço para 10 amostras. Todas foram produzidas com a mesma largura e altura do *offset* do porta amostras da banda X (22,86 mm x 10,16 mm).

Figura 3.1. Modelo 3D do molde produzido.



Fonte: Produção do autor.

Figura 3.2. Moldes de PLA produzidos por manufatura aditiva.



Fonte: Produção do autor.

Para preparar a amostra de silicone puro, foram pesados 5 g de silicone utilizando uma balança de precisão, quantidade suficiente para preencher uma cavidade do molde, e adicionados 0,15 g de um catalisador (correspondente a 3% da massa total de silicone) para acelerar o processo de endurecimento da matriz. O silicone e o catalisador foram misturados manualmente com o auxílio de uma espátula por dois minutos até obter uma mistura uniforme.

O procedimento de preparação das amostras com aditivo de SiC e Ni foi similar ao anterior, variando apenas as quantidades. Foram feitas 7 amostras contendo 40% de concentração de SiC, variando a concentração de níquel entre 3% e 17%, utilizando 5% da massa total de silicone de catalisador. Por fim, foram feitas 2 amostras contendo 5% e 10% de níquel disperso na matriz de silicone, sem o aditivo de SiC, utilizando também 5% da massa total de silicone em catalisador.

Figura 3.3. Becker contendo matriz de silicone aditivada com SiC e Ni, sendo pesados por uma balança de precisão.



Fonte: Produção do autor.

Figura 3.4. Amostras preparadas.



Fonte: Produção do autor.

As amostras foram deixadas em repouso à temperatura ambiente por 1 semana para que o compósito pudesse endurecer adequadamente. Após o processo de secagem, todas as amostras tiveram suas espessuras medidas utilizando um micrômetro digital. A concentração de silicone, SiC, níquel e catalisador de cada uma das amostras, bem como a massa de cada um dos itens e a espessura final de cada uma das amostras são observadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Concentração de silicone, SiC, níquel e catalisador de cada uma das amostras, massa de cada um dos itens e espessura final das amostras.

Numeração	Espessura	Amostra	Silicone	Catalizador	SiC	Ni
01	6,92 mm	Branco	5 g	0,15g	---	---
02	6,92 mm	40% SiC + 3% Ni + 57% Silicone	2,85 g	0,14 g	2,00 g	0,15 g
03	6,93 mm	40% SiC + 5% Ni + 55% Silicone	2,75 g	0,1375 g	2,00 g	0,25 g
04	6,79 mm	40% SiC + 7% Ni + 53% Silicone	2,65 g	0,1325 g	2,00 g	0,35 g
05	6,82 mm	40% SiC + 10% Ni + 50% Silicone	2,50 g	0,1250 g	2,00 g	0,50 g
06	6,67 mm	40% SiC + 13% Ni + 47% Silicone	2,35 g	0,1175 g	2,00 g	0,65 g
07	6,70 mm	40% SiC + 15% Ni + 45% Silicone	2,25 g	0,1125 g	2,00 g	0,75 g
08	6,70 mm	40% SiC + 17% Ni + 43% Silicone	2,15 g	0,1075 g	2,00 g	0,85 g
09	6,95 mm	5% Ni + 95% Silicone	4,75 g	0,2375 g	---	0,25 g
10	6,95 mm	10% Ni + 90% Silicone	4,50 g	0,2250 g	---	0,5 g

Fonte: Produção do autor.

3.2 Caracterização eletromagnética

Utilizando um Analisador de Rede Vetorial (*Vector Network Analyzer* - VNA) acoplado a um guia de ondas retangular na faixa de frequência da banda X (8,2

GHz a 12,4 GHz), foi realizado a caracterização das propriedades eletromagnéticas do material, obtendo valores para a permissividade elétrica, a permeabilidade magnética, transmitância, refletância e absorção das amostras. Esse instrumento de medida encontra-se alocado no COPDT/INPE.

Para analisar a absorção da radiação incidente pelo material, foram utilizados os valores apresentados na Tabela 3.2, que apresentam a relação entre os valores de refletividade encontrados na escala em decibel e o percentual de energia absorvida pelo material.

Tabela 3.2. Relação entre a refletividade do material e o percentual de energia absorvida.

Valor em dB	% da absorção da radiação incidente
0	0
-3	50
-10	90
-15	96,9
-20	99
-30	99,9
-40	99,99

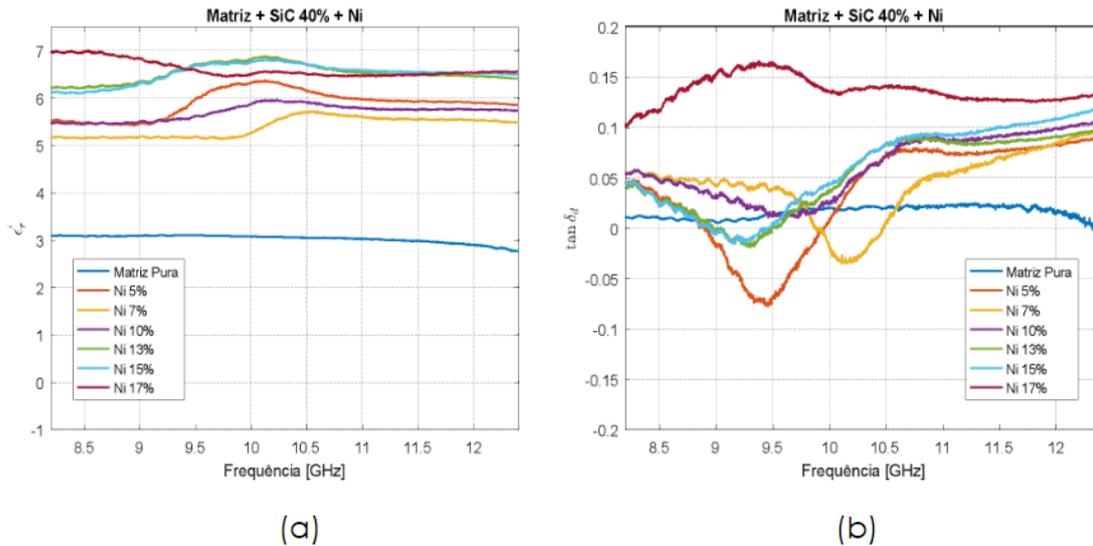
Fonte: Adaptada de [4].

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise das propriedades eletromagnéticas dos compósitos de matriz polimérica contendo 40% de carbeto de silício (SiC) e diferentes concentrações de níquel (Ni) foi realizada com o intuito de compreender o comportamento desses materiais na faixa de frequências de 8,5 GHz a 12 GHz. Inicialmente,

foram avaliadas as propriedades de permissividade elétrica, cujos resultados estão apresentados em dois gráficos, representados na Figura 4.1.

Figura 4.1. Gráficos referentes à (a) ϵ'_r e (b) tangente de perda dielétrica das amostras.



Fonte: Produção do autor.

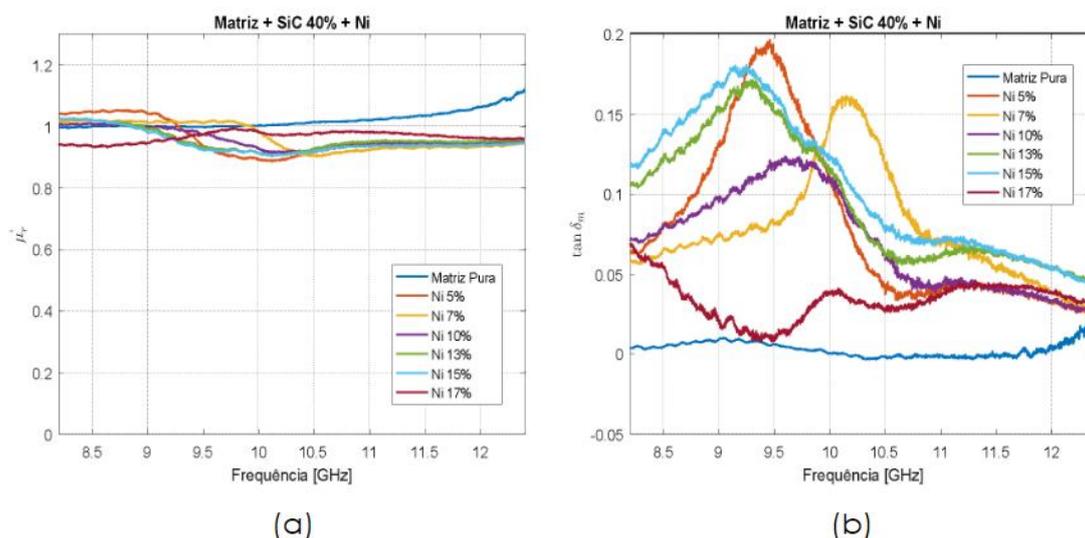
A Figura 4.1(a) mostra a parte real da permissividade elétrica, que indica a capacidade do material de armazenar energia elétrica. Observa-se que a matriz pura exibe valores menores e constantes ao longo da faixa de frequência analisada, enquanto as amostras com adição de níquel apresentam um aumento gradual dessa capacidade. Esse comportamento pode ser atribuído à presença de partículas de níquel, que aumentam a polarização interna do material, favorecendo o armazenamento de energia. À medida que a concentração de níquel aumenta, a parte real da permissividade também se eleva, o que indica uma maior eficiência na resposta elétrica do material.

O segundo gráfico apresentado para a permissividade elétrica refere-se à tangente de perda dielétrica ($\tan \delta_d$), que representa a relação entre as perdas de energia e a capacidade de armazenamento de energia no material. Em

materiais dielétricos, essas perdas estão associadas à dissipação de energia elétrica na forma de calor. No gráfico, observa-se que a matriz pura apresenta uma tangente de perda praticamente nula, o que indica baixas perdas dielétricas. No entanto, conforme o teor de níquel aumenta, é identificado um aumento nas perdas dielétricas, especialmente para a amostra com 17% de níquel, que apresenta picos mais pronunciados entre 9 GHz e 11 GHz. Esse comportamento sugere que, além de melhorar o armazenamento de energia elétrica, a adição de níquel também aumenta a dissipação dessa energia, convertendo-a em calor.

Depois, foram feitas as análises das propriedades de permissividade magnética, apresentadas em dois gráficos na Figura 4.2.

Figura 4.2. Gráficos referentes à (a) μ'_r e (b) tangente de perda magnética das amostras.



Fonte: Produção do autor.

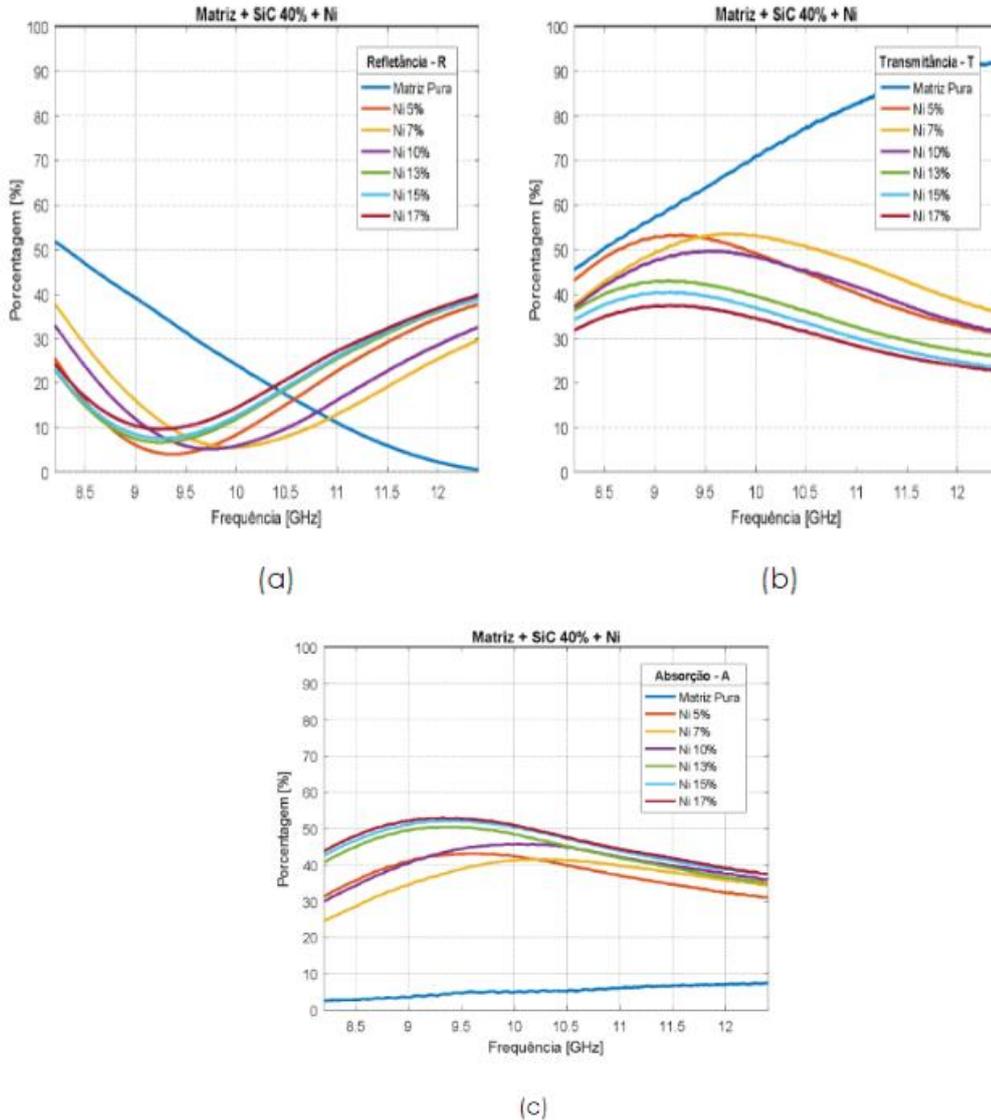
No gráfico da parte real da permeabilidade magnética, Figura 4.2(a) , observa-se que a matriz pura apresenta uma permeabilidade relativa em torno de 1, o que é esperado para materiais não magnéticos. Já as amostras contendo

níquel demonstram um comportamento mais complexo, com uma leve queda na permeabilidade para frequências acima de 9,5 GHz, seguida de um aumento gradual para as frequências mais altas, tendo um comportamento geral de um material diamagnético. Esse fenômeno sugere que o níquel introduz uma resposta magnética no material, ainda que pequena, especialmente nas concentrações mais baixas.

No segundo gráfico relacionado à permeabilidade magnética, observa-se a tangente de perda magnética, que mede as perdas de energia associadas ao comportamento magnético do material. As amostras com maior teor de níquel apresentam picos acentuados de perdas magnéticas entre 9 GHz e 10,5 GHz, com destaque para as concentrações de 13% e 15%. Isso indica que o material dissipa uma parte significativa da energia eletromagnética por meio de processos magnéticos, o que contribui para o aumento da eficiência na absorção de radiação.

Também foram analisadas as propriedades de refletância (R), transmitância (T) e absorção (A) dos compósitos, apresentados na Figura 4.3.

Figura 4.3. Gráficos referentes à (a) refletância, (b) transmitância e (c) absorção das amostras.



Fonte: Produção do autor.

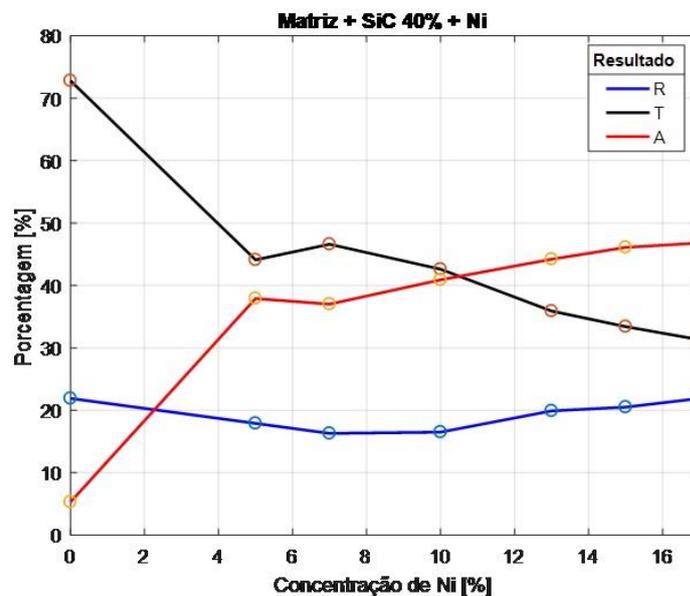
O gráfico de refletância denota que a matriz pura reflete uma grande parte da radiação incidente, especialmente nas frequências mais baixas, com uma queda significativa de refletância a partir de 9 GHz. À medida que a concentração de níquel aumenta, a refletância das amostras diminui, indicando que o material está absorvendo mais radiação eletromagnética e, conseqüentemente, refletindo menos. O gráfico de transmitância, por sua vez, revela que a matriz pura permite

que a maior parte da radiação passe através dela, enquanto as amostras com níquel reduzem significativamente essa transmitância, com destaque para as amostras com 17% de níquel, que apresentam uma transmitância mínima de aproximadamente 20%.

A absorção foi calculada analiticamente a partir dos valores de refletância e transmitância, e os resultados mostram um comportamento esperado: as amostras com maiores concentrações de níquel exibem maiores valores de absorção na faixa de 9 GHz a 11 GHz. Esse comportamento confirma a eficácia do compósito como absorvedor de radiação eletromagnética, com destaque para a amostra de 17% de níquel, que apresenta o melhor desempenho, absorvendo cerca de 55% da radiação incidente em seu pico máximo de absorção.

Para comparar os resultados obtidos de Refletância, Transmitância e Absorção das amostras contendo SiC e Ni, foi feito o gráfico da Figura 4.4, que sintetiza as informações para melhor compreensão das análises feitas.

Figura 4.4. Gráfico referente aos valores de refletância, transmitância e absorção das amostras baseados no aumento na concentração de níquel.

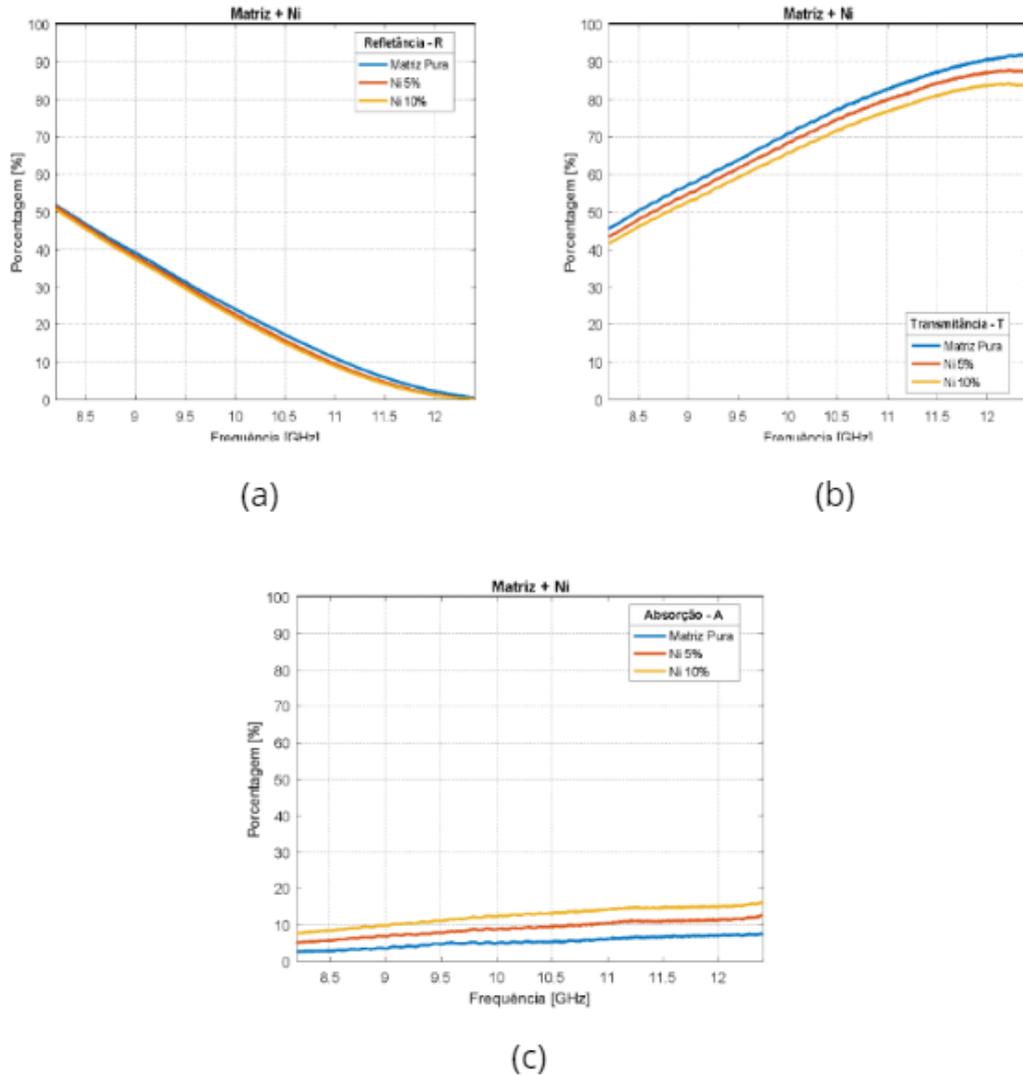


Fonte: Produção do autor.

Observa-se que a refletância possui pouca variação com o aumento da concentração de níquel. A transmitância, por sua vez, apresenta uma queda acentuada entre 0% e 5%, diminuindo de forma gradativa à medida em que há o aumento na concentração de Ni. Já a absorção apresenta um comportamento oposto à transmitância, aumentando de forma acentuada entre 0% e 5% de níquel e continuando a crescer de forma suave até estabilizar-se por volta de 40% para concentrações superiores a 10%. Esses resultados demonstram que a adição de níquel, principalmente na faixa de 5% a 10%, melhora significativamente a capacidade do material de absorver radiação, enquanto mantém baixa a transmitância, o que torna o compósito um eficiente absorvedor de radiação eletromagnética.

Por fim, foram feitas as análises de refletância, transmitância e absorção para as amostras contendo apenas o níquel como aditivo disperso na matriz de silicone, que podem ser observados nos gráficos da Figura 4.5.

Figura 4.5. Gráficos referentes à (a) refletância, (b) transmitância e (c) absorção das amostras contendo apenas silicone + Ni.



Fonte: Produção do autor.

Os gráficos apresentados fornecem uma análise detalhada dos parâmetros de refletância (R), transmitância (T) e absorção (A) em função da frequência para amostras contendo apenas uma matriz de silicone com diferentes concentrações de níquel (0%, 5% e 10%). Observa-se que, no gráfico de refletância, a quantidade de radiação refletida pela matriz diminui à medida que a frequência aumenta, com a matriz pura apresentando a maior refletância em comparação com as amostras que contêm níquel. A presença de níquel

reduz ligeiramente a refletância, sugerindo que sua adição altera as propriedades reflexivas do material.

No gráfico de transmitância, nota-se que, com o aumento da frequência, há uma diminuição na quantidade de radiação transmitida através da matriz. Contudo, assim como na refletância, as amostras com 5% e 10% de níquel apresentam uma transmitância ligeiramente inferior à da matriz pura, o que indica que o níquel introduz uma leve barreira à passagem da radiação. Por outro lado, no gráfico de absorção, percebe-se que as amostras contendo níquel têm uma absorção maior em relação à matriz pura, ainda que os valores absolutos de absorção sejam relativamente baixos. Esse aumento da absorção pode estar relacionado à diminuição tanto da refletância quanto da transmitância, demonstrando que uma parte da energia que antes era refletida ou transmitida está sendo absorvida pelo material.

Ao comparar essa análise com a anterior, referente aos gráficos que envolvem a matriz de silicone contendo 40% de carbeto de silício (SiC) e concentrações variáveis de níquel, as diferenças são evidentes. Nos gráficos anteriores, a presença do carbeto de silício em combinação com o níquel resultou em uma maior complexidade nas respostas dos parâmetros eletromagnéticos, com maior impacto tanto na permissividade elétrica quanto nas tangentes de perda dielétrica e magnética. A presença do SiC, além do níquel, contribuíram para uma melhor absorção da radiação eletromagnética na faixa de 8,5 a 12 GHz, com valores de absorção mais elevados em comparação à matriz contendo apenas silicone e níquel.

Ademais, no caso da matriz com SiC, houve uma redução mais significativa na refletância e transmitância, sugerindo que a combinação de SiC e níquel melhora a capacidade de absorção do material em relação ao sistema composto apenas por silicone e níquel. A presença do SiC parece aumentar as perdas dielétricas e magnéticas, o que potencializa a dissipação de energia eletromagnética no material. Dessa forma, conclui-se que a inclusão de carbeto de silício, em conjunto com o níquel, resulta em um material com melhores

propriedades de absorção de radiação, tornando-o mais eficiente como material absorvedor em comparação com a matriz que contém apenas silicone e níquel.

5. CONCLUSÃO

Este estudo empreendeu o desenvolvimento de um compósito com a capacidade de absorver ou atenuar radiação eletromagnética na faixa de frequência de 8,2 a 12,4 GHz. Para essa finalidade, uma matriz polimérica de silicone foi dopada com carbeto de silício e níquel como aditivos, mantendo a concentração do primeiro em 40% e variando a concentração de níquel entre 0% e 17%. Amostras foram preparadas mantendo as mesmas dimensões, seguidas pela análise eletromagnética dos parâmetros de permissividade complexa e absorção.

Tendo como base as análises realizadas, é observado a influência significativa da adição de níquel em matrizes compostas por SiC e também em matrizes contendo apenas silicone e níquel no comportamento eletromagnético dos materiais. Nos sistemas contendo SiC, verificou-se que a adição de níquel resultou em um aumento considerável na capacidade de absorção de radiação eletromagnética, enquanto a transmitância foi reduzida drasticamente até se estabilizar. A refletância, por sua vez, permaneceu baixa, o que confirma a eficácia desses compósitos como materiais absorvedores de radiação.

Ao comparar esses resultados com as matrizes contendo apenas silicone e níquel, foi notado que a inclusão do carbeto de silício (SiC) na matriz potencializa a absorção de radiação, especialmente em frequências mais altas, com a tangente de perda magnética e a tangente de perda dielétrica indicando melhorias substanciais nas propriedades de dissipação de energia eletromagnética. Assim, conclui-se que a combinação de SiC com níquel em proporções adequadas oferece um material com propriedades otimizadas para absorção de radiação eletromagnética, sendo promissor para aplicações em blindagem eletromagnética e redução de interferências.

REFERÊNCIAS

- [1] IDRIS, Fadzidah Mohd et al. Recent developments of smart electromagnetic absorbers based polymer-composites at gigahertz frequencies. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 405, p. 197-208, 2016.
- [2] BAI, Lin et al. Multi-satellite relay transmission in 5G: Concepts, techniques, and challenges. **IEEE Network**, v. 32, n. 5, p. 38-44, 2018.
- [3] Nohara, E.L., 2003, “Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética (8-12 GHz) Obtidos pela Combinação de Compósitos Avançados Dielétricos e Revestimentos Magnéticos”, Ph.D. Thesis, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, S.P., Brasil.
- [4] SILVA, Valdirene Aparecida da et al. Comportamento eletromagnético de materiais absorvedores de micro-ondas baseados em hexaferrita de Ca modificada com íons CoTi e dopada com La. **Journal of Aerospace Technology and Management**, v. 1, p. 255-263, 2009.
- [5] SADDOW, Stephen E.; AGARWAL, Anant K. **Advances in silicon carbide processing and applications**. Artech House, 2004.
- [6] YAMADA, Koichi; MOHRI, Masahide. Properties and applications of silicon carbide ceramics. In: **Silicon Carbide Ceramics—1: Fundamental and Solid Reaction**. Dordrecht: Springer Netherlands, 1991. p. 13-44.
- [7] HOZER, Leszek; LEE, Jonq-Ren; CHIANG, Yet-Ming. Reaction-infiltrated, net-shape SiC composites. **Materials Science and Engineering: A**, v. 195, p. 131-143, 1995.
- [8] FRAGA, M. A. et al. Carbetto de silício como material base para sensores mems de uso aeroespacial: Uma visão geral. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 19, p. 274-290, 2014.

- [9] MARRA, D. Carbetto de Silício – Mostra de materiais. Disponível em: <<https://www.encimat.cefetmg.br/2018/05/07/carbetto-de-silicio/>>. Acesso em: 1 ago. 2023.
- [10] BRAGA, S.L.S. Análise do comportamento térmico do forno Acheson e da sua camada de mistura isolante. 2011. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia) – Universidade Federal de São João Del Rei, São João Del Rei, 2011.
- [11] ABEL, João Luis. **Obtenção do carboneto de silício pela redução carbotérmica da sílica**. 2009. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo..
- [12] PATIL, K. C. Advanced ceramics: combustion synthesis and properties. **Bulletin of Materials Science**, v. 16, p. 533-541, 1993.
- [13] RUMYANTSEV, Sergey; SHUR, Michael S.; LEVINSHTEIN, Michael E. (Ed.). **Sic Materials And Devices-Volume 1**. World Scientific, 2006.
- [14] HANSEN, L. Investigação dos efeitos de recozimento em atmosfera de argônio sobre a estrutura SiC/SiO₂. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2014.
- [15] JAYATIRTHA, H. N.; SPENCER, M. G. Cubic SiC the Forgotten Polytype. **MRS Online Proceedings Library**, v. 410, p. 329-336, 1995.
- [16] IZHEVSKYI, V. A. et al. Review article: silicon carbide. **Structure, properties and processing. Cerâmica**, v. 46, n. 297, p. 4-13, 2000.
- [17] WESCH, W. Silicon carbide: synthesis and processing. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam interactions with materials and atoms**, v. 116, n. 1-4, p. 305-321, 1996.

- [18] CHIMELLI, Caio Pezzi. Processamento, caracterização e propriedades do carbeto de silício (SiC) obtido por sinterização de fase líquida. (COPPE/UFRJ, D.Sc Engenharia Metalúrgica e de materiais), Tese - UFRJ, RJ, 2010.
- [19] GERMANO, P. Carbeto de Silício - Propriedades, aplicações e mercado. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.
- [20] TASKER, S. Z.; STANDLEY, E. A.; JAMISON, T. F. Recent advances in homogeneous nickel catalysis. **Nature**, v. 509, n. 7500, p. 299–309, 14 maio 2014.
- [21] CARNES, M. et al. A Stable Tetraalkyl Complex of Nickel(IV). **Angewandte Chemie International Edition**, v. 48, n. 2, p. 290–294, 22 dez. 2008.
- [22] SCHMIDT, Walfredo. **Materiais elétricos—vol. 2: Isolantes e magnéticos**. Editora Blucher, 2019.
- [23] TENÓRIO, P. Obtenção e caracterização de cerâmicas $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ e avaliação de suas propriedades para aplicação como material absorvedor de radiação eletromagnética. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2023.
- [24] SOUZA, A. Materiais absorvedores de radiação eletromagnética multicamada na faixa de frequência 12,4 A 18,0 GHz. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2021.
- [25] LOPES, B. H. K. 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, São José dos Campos, 2020.
- [26] DARTORA, C. A. et al. Caracterização experimental da permissividade dielétrica de materiais através da técnica de refletometria no domínio do tempo. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 37, p. 1315, 2015.

[27] COSTA, Filippo et al. Electromagnetic characterisation of materials by using transmission/reflection (T/R) devices. **Electronics**, v. 6, n. 4, p. 95, 2017.

[28] PETROLI, L. Avaliação de um Modelo para Integridade de Sinais em Circuitos Eletrônicos Complexos. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

[29] DE ENGENHARIA, E. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL DESENVOLVIMENTO DE REVESTIMENTOS COLORIDOS REFLETORES DA RADIAÇÃO INFRAVERMELHA PROVENIENTE DA RADIAÇÃO SOLAR. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.