



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

**CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES ELETROMAGNÉTICAS DE
COMPÓSITOS HÍBRIDOS A BASE DE ADITIVOS ELÉTRICOS E
MAGNÉTICOS DISPERSOS EM MATRIZES DIELÉTRICAS NA FAIXA DE
FREQUÊNCIA DE MICRO-ONDAS REFERENTE A BANDA X.**

Aline de Oliveira Sant'Anna Nogueira

Relatório de Iniciação Científica do Programa
PIBIC, orientado por Maurício Ribeiro Baldan
e Bráulio Haruo Kondo Lopes.

URL do documento original:

< >

INPE
São José dos Campos
2020



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

**CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES ELETROMAGNÉTICAS DE
COMPÓSITOS HÍBRIDOS A BASE DE ADITIVOS ELÉTRICOS E
MAGNÉTICOS DISPERSOS EM MATRIZES DIELÉTRICAS NA FAIXA DE
FREQUÊNCIA DE MICRO-ONDAS REFERENTE A BANDA X.**

Aline de Oliveira Sant'Anna Nogueira

Relatório de Iniciação Científica do Programa
PIBIC, orientado por Maurício Ribeiro Baldan
e Bráulio Haruo Kondo Lopes.

URL do documento original:

< >

INPE
São José dos Campos
2020

RESUMO

O desenvolvimento de materiais com boa capacidade de absorção de radiações eletromagnéticas é muito importante para setores como 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 que além de diminuir a energia das radiações, possuem baixo peso e boa processabilidade. Estes materiais são chamados de materiais absorvedores de radiação eletromagnética (MARE) 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 híbridos, a base de aditivos magnéticos e elétricos, dispersos em uma matriz de silicone branco. Foram produzidas amostras com particulados de ferrita manganês e zinco (FeMnZn) com grafite (G) e amostras com particulados de ferro carbonila (FC) com grafite. A proporção do aditivo elétrico (grafite) foi variada, utilizando porcentagens de 1, 5, 10 e 15% em relação a quantidade em massa de silicone branco. Já os aditivos magnéticos (FeMnZn e FC) foram determinadas uma concentração fixa de 70 % em peso dos particulados em todas as amostras. As dimensões das amostras foram de 10,2 x 22,9 mm e com espessura de 2 mm. A caracterização eletromagnética foi realizada através de um Analisador de Rede Vetorial e guia de onda retangular WR90, e a faixa de frequência analisada foi de 8,2 a 12,4 GHz, referente a banda X, utilizada em setores de telecomunicações, dispositivos de satélites 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. Compósitos poliméricos. Grafite.

ABSTRACT

The development of materials with good absorption capacity of electromagnetic radiation is very important for sectors such as civil, military and aerospace, due to the large amount of radiation in which some devices are exposed. Composites based on magnetic and electrical additives dispersed in dielectric polymer matrices that, in addition to reducing the energy of radiation, have low weight and good processability. These materials are called electromagnetic radiation absorbing materials (MARE) and can be constituted based on carbon, ferrite, carbon black, graphene oxide, carbon fibers and polymer, joined to some magnetic and dielectric filter. The present work aims to develop hybrid composites, based on magnetic and electrical additives, dispersed in a white silicone matrix. Samples were produced with manganese ferrite and zinc particulates (FeMnZn) with graphite (G) and samples with carbonyl iron particulates (FC) with graphite. The proportion of the electric additive (graphite) was varied, using percentages of 1, 5, 10 and 15% in relation to the mass quantity of white silicone. Magnetic additives (FeMnZn and FC) were determined at a fixed concentration of 70 % by weight of particulates in all samples. The sample dimensions were 10.2 x 22.9 mm and with a thickness of 2 mm. The electromagnetic characterization was performed through a Vector Network Analyzer and rectangular waveguide WR90, and the frequency range analyzed was 8.2 to 12.4 GHz, referring to the X-band, used in telecommunications sectors, satellite devices and military radars. The results obtained from the reflectivity assay showed high values (>90%) electromagnetic radiation absorption and there was an increase in the ability to store energy from composites without alteration in their electromagnetic behavior in a macroscopic manner.

Key words: Electromagnetic radiation absorbing materials. Band X. Polymeric composites. Graphite.

LISTA DE FIGURAS

| | <u>Pág.</u> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Figura 1- Representação esquemática da estrutura cristalina da ferrita..... | 4 |
| Figura 2- Representação da estrutura da ferropentacarbonila..... | 5 |
| Figura 3- Estruturas alotrópicas do carbono..... | 6 |
| Figura 4- Representação esquemática dos sinais referentes ao parâmetro S dentro de um guia de onda..... | 8 |
| Figura 5- Representação esquemática do método de refletividade..... | 9 |
| Figura 6- Etapas do processamento das amostras..... | 13 |
| Figura 7- Componentes do sistema de caracterização eletromagnética..... | 14 |
| Figura 8- MEV dos particulados de (a) grafite, (b) FeMnZn e (c) FC..... | 15 |
| Figura 9- Difractometria de raio X..... | 16 |
| Figura 10- Permissividade (a) real e (b) imaginária dos compósitos híbridos de FeMnZn e grafite..... | 18 |
| Figura 11- Permeabilidade (a) real e (b) imaginária dos compósitos híbridos de FeMnZn e grafite..... | 18 |
| Figura 12- Tangente de perda (a) elétrica e (b) magnética dos compósitos híbridos de FeMnZn e grafite..... | 19 |
| Figura 13- Permissividade (a) real e (b) imaginária dos compósitos híbridos de FC e grafite..... | 20 |
| Figura 14- Permeabilidade (a) real e (b) imaginária dos compósitos híbridos de FC e grafite..... | 20 |
| Figura 15- Tangente de Perda (a) elétrica e (b) magnética dos compósitos híbridos de FC e grafite..... | 21 |
| Figura 16- Comportamento eletromagnético das amostras de FeMnZn e Grafite. (a) Transmissão, (b) Reflexão, (c) Absorção e (a) Absorção efetiva..... | 22 |
| Figura 17- Comportamento eletromagnético das amostras de FC e Grafite. (a) Transmissão, (b) Reflexão, (c) Absorção e (a) Absorção efetiva..... | 23 |
| Figura 18- Refletividade das amostras de (a) FeMnZn com grafite e (b) FC com grafite... 24 | 24 |
| Figura 19- Potencial de absorção simulado referente as amostras de (a) FeMnZn + 1%G, (b) FeMnZn + 5%G, (c) FeMnZn + 10%G e (d) FeMnZn + 15%G..... | 26 |
| Figura 20- Potencial de absorção simulado referente as amostras de (a) FC + 1%G, (b) FC + 5%G, (c) FC + 10%G e (d) FC + 15%G..... | 27 |

LISTA DE TABELAS

| | <u>Pág.</u> |
|----------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Tabela 1- Relação entre refletividade e a porcentagem da energia absorvida. | 10 |
| Tabela 2- Composição das amostras..... | 12 |

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

| | |
|--------|--------------------------------------------------------|
| IEM | Interferência Eletromagnética |
| MARE | Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética |
| NRW | Modelo matemático Nicholson Ross Weir |
| FeMnZn | Ferrita manganês e zinco |
| FC | Ferro carbonila |
| G | Grafite |
| DRX | Difratômetro de Raio X |
| MEV | Microscópio Eletrônico de Varredura |
| 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

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 2. OBJETIVOS | 3 |
| 2.1. Objetivos específicos | 3 |
| 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 4 |
| 3.1. Materiais utilizados | 4 |
| 3.2. Caracterização eletromagnética | 6 |
| 3.2.1 Propriedades eletromagnéticas | 6 |
| 3.2.2 Caracterização do comportamento eletromagnético | 8 |
| 3.2.3 Ensaio de refletividade | 9 |
| 4. MATERIAIS E MÉTODOS | 11 |
| 4.1. Processamento do material compósito | 11 |
| 4.2. Caracterização estrutural e morfológica | 13 |
| 4.3. Caracterização eletromagnética | 14 |
| 5. ANÁLISES E RESULTADOS | 15 |
| 5.1 Caracterização morfológica | 15 |
| 5.2 Caracterização estrutural | 15 |
| 5.3 Caracterização eletromagnética | 17 |
| 5.3.1 Propriedades do compósito de ferrita manganês e zinco com grafite | 17 |
| 5.3.2 Propriedades do compósito de ferro carbonila com grafite | 19 |
| 5.3.3 Comportamento eletromagnético dos compósitos de ferrita manganês e zinco com grafite e dos compósitos de ferro carbonila com grafite. | 21 |
| 5.3.5 Ensaio de Refletividade | 23 |
| 5.3.6 Simulação do potencial de absorção dos compósitos de ferrita manganês e zinco com grafite | 25 |
| 5.3.7 Simulação do potencial de absorção dos compósitos de ferro carbonila com grafite | 27 |
| 6. CONCLUSÕES | 28 |
| 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 29 |

1. INTRODUÇÃO

Devido ao rápido desenvolvimento dos dispositivos eletrônicos e de comunicação, houve um aumento do fenômeno conhecido como poluição eletromagnética (S. Mishra et al., 2019). Este fenômeno ocorre devido a ampla aplicação e exposição de ondas eletromagnéticas na faixa de micro-ondas (Meng et al., 2009). E para tentar reduzir as interferências eletromagnéticas (IEM) causadas nos dispositivos, ocorreu um aumento na demanda para materiais absorvedores de radiação eletromagnética (MARE).

A blindagem contra IEM realizada é definido como o fenômeno que ocorre quando um determinado material reflete ou absorve a radiação eletromagnética incidente, impedindo que ocorra sua transmissão através do material (Chung, 2001; S. Mishra et al., 2019). Portanto, o material atua como um escudo, impedindo a passagem da radiação. Como os metais possuem muitos elétrons livres, ocorre uma grande interação com o campo eletromagnético da radiação e devido a isso, possuem boas propriedades para atuar como protetores (Chung, 2001; M. Mishra et al., 2013).

Os MAREs além de reduzir a IEM, são necessários em aplicações na área civil e militar, como por exemplo em sistemas de telecomunicações (da Silva et al., 2009) e dispositivos usados em satélites (Gama, 2006). Além dos metais, é possível utilizar materiais a base de carbono (Liu et al., 2010), ferritas (Lopes et al., 2020), negro de fumo (Pinho et al., 1999), e óxido de grafeno (Shu et al., 2018), unidos a algum filtro magnético e dielétrico (M. Mishra et al., 2013). A utilização de materiais compósitos para este tipo de função é importante pois além de ter propriedades tão boas quanto as propriedades dos metais, eles apresentam uma simples processabilidade e baixo peso. Além destas características, os materiais de blindagem IEM precisam ter resistência química e à corrosão, flexibilidade e baixo custo (González et al., 2018).

Os polímeros são transparentes para a onda eletromagnética devido a seu caráter dielétrico, no entanto a incorporação de nanopartículas magnéticas em uma matriz polimérica está se tornando um método eficaz para a blindagem IEM (González et al., 2018). Um compósito

com matriz de silicone por exemplo possui boa estabilidade química e térmica (Raza et al., 2011). As ferritas começaram a ser utilizadas como materiais magnéticos na década de 40 e a primeira encontrada foi a Fe_3O_4 , conhecida como magnetita (RODRIGUES, 2010/ GOMES 2014). A ferro carbonila é amplamente utilizada em MARE, devido a sua alta permeabilidade, boa estabilidade térmica e alta intensidade de magnetização de saturação (Gama & Rezende, 2010; Min, 2019). Materiais a base de carbono, como o grafite, também possuem boas propriedades de absorção de micro-ondas (Xu et al., 2015). Na literatura já existem trabalhos que utilizam o grafite junto com outros particulados, com o objetivo de melhorar seu potencial de absorção de radiação eletromagnética e reduzir o seu custo (M. Mishra et al., 2013; Xu et al., 2013, 2015).

Os compósitos poliméricos têm sido de grande interesse em diversos setores e estão sendo estudados frequentemente (da Silva et al., 2009; Klygach et al., 2019). No entanto, é necessário adicionar a uma matriz polimérica um aditivo que seja eficaz em pequenas concentrações, facilitando o processamento para aumento do desempenho e redução de custos e de peso (Chung, 2001). A capacidade de controlar os valores de permissividade e de permeabilidade dos compósitos é desejável em aplicações de blindagem IEM (Klygach et al., 2019). Para desenvolver um material de blindagem é essencial a utilização de um material dielétrico como matriz e um material condutor como aditivo, e por isso o compósito híbrido tem sido bastante estudado (Portes et al., 2019). O compósito híbrido é definido pela combinação de partículas elétricas e magnéticas em um mesmo material, proporcionando propriedades como leveza, estabilidade mecânica e alto desempenho eletromagnético ao material (Lopes et al., 2020).

Neste trabalho, foi realizado um estudo de um material compósito a base de aditivos elétricos carbonosos e magnéticos dispersos em uma matriz polimérica com o intuito de analisar a influência da composição do material no potencial de absorção da radiação eletromagnética. 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 híbridos capazes de desempenhar alta capacidade de atenuação de determinadas radiações eletromagnéticas utilizadas no setor aeroespacial (Banda X), e contribuir para o desenvolvimento desta tecnologia no Brasil.

2.1. Objetivos específicos

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

Analisar as concentrações de aditivos elétricos capazes de contribuir significativamente no potencial de absorção eletromagnéticas de compósitos híbridos.

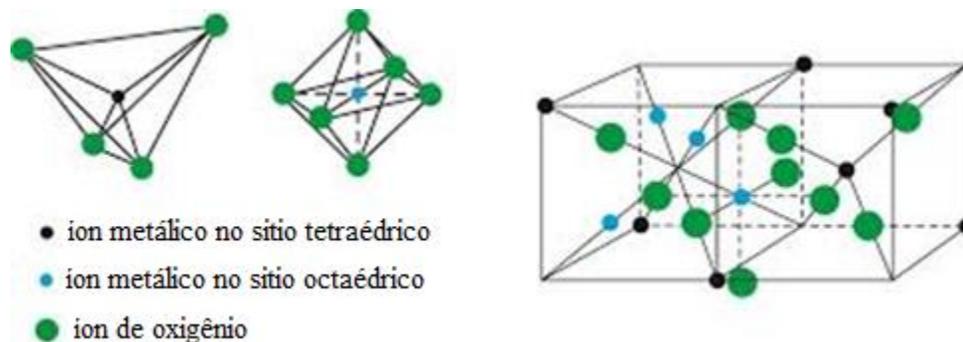
Determinar as melhores condições de processamento a fim de se obter um compósito homogêneo e com aceitável desempenho eletromagnético.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. Materiais utilizados

As ferritas são muito estudadas por causa de sua estrutura cúbica cristalina que apresenta boa permeabilidade magnética e alta resistividade térmica (RODRIGUES, 2010). A ferrita de manganês e zinco (FeMnZn) possui a estrutura de um cristal espinélio, onde os cátions metálicos ocupam posições tetraédricas e octaédricas (Morrison et al., 2003). A estrutura da ferrita pode ser classificada em espinélio normal, inverso ou misto e esta classificação é determinada de acordo com a ocupação dos sítios intersticiais (Christine et al., 2012). A Figura 1 apresenta os dois tipos de estruturas das ferritas.

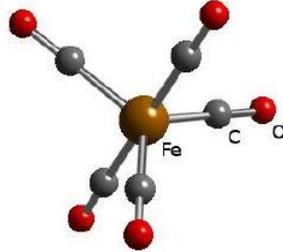
Figura 1- Representação esquemática da estrutura cristalina da ferrita.



Fonte: Christine et al. (2012).

A ferro carbonila (FC) é obtida através da decomposição térmica da ferropentacarbonila, com uma estrutura semelhante a Figura 2. 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).

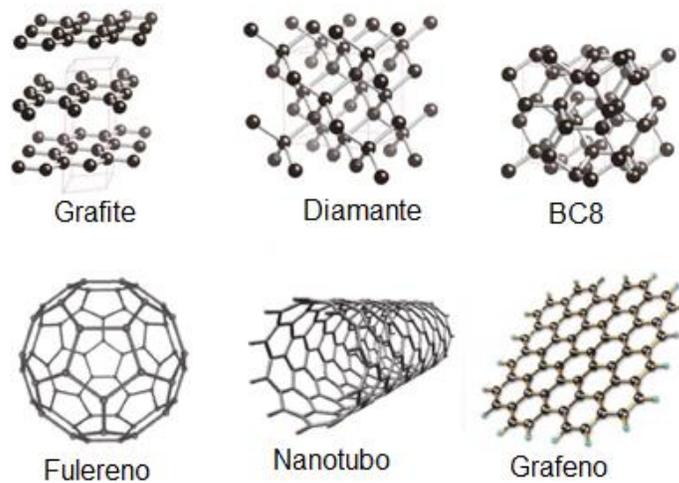
Figura 2- Representação da estrutura da ferropentacarbonila.



Fonte: LOPES. (2020).

Os materiais a base de carbono apresentam grande versatilidade de propriedades devido as diferentes alotropias possíveis em suas estruturas cristalinas. Como destaque dessas propriedades é possível baixo peso, estabilidade química e térmica, e em alguns casos como o do grafite e negro de fumo, baixo custo de produção. As diferentes estruturas cristalinas do carbono dependem das ligações de seus cristais, dentre essas estruturas podemos citar o grafite, diamante, nanotubo de carbono, fibra de carbono e fulereno (Oganov et al., 2013), como demonstrado na Figura 3. As micro partículas de grafite oferecem excelentes propriedades elétricas como alta condutividade e propriedades químicas como resistência a corrosão. O grafite é comercialmente atraente devido ao baixo custo e por isso são utilizados em diversas aplicações como baterias, sensores e compósitos estruturais (Raza et al., 2011).

Figura 3- Estruturas alotrópicas do carbono.



Fonte: adaptado de Oganov et al. (2013).

3.2. Caracterização eletromagnética

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) e que também é conhecido como método de transmissão e reflexão para materiais homogêneos e isotrópicos (GAMA, 2010/ LOPES, 2020).

A permissividade elétrica ϵ e a permeabilidade magnética μ são definidos 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 a excitação gerada pelo campo aplicado causa uma variação na distribuição das nuvens 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 suma importância a caracterização destas

propriedades afim de estudar e analisar como controlar e melhorar o potencial de absorção de um material compósito variando sua composição interna (LOPES, 2020/ GAMA, 2010).

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') são referentes as fenômenos capacitivos e a parte imaginária (ϵ'' , μ'') são referentes as fenômenos dissipativos do material (LOPES, 2020).

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

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

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 os fenômenos dissipativos no interior do meio, é recorrente a utilização do fator tangente de perda elétrica $\tan \delta_\epsilon$, 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. 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).

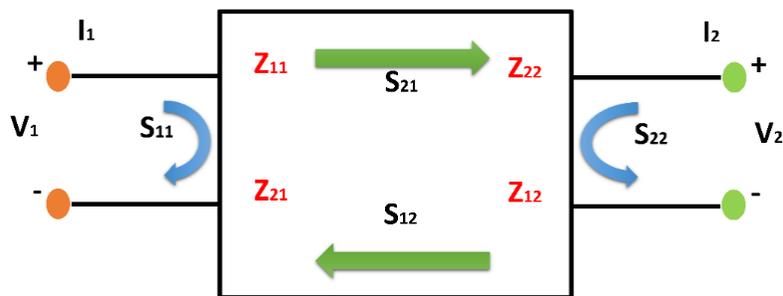
$$\tan \delta_\epsilon = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (3)$$

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

3.2.2 Caracterização do comportamento eletromagnético

A Figura 4 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 determinada amostra. A onda eletromagnética ao interagir com o material irá gerar 2 sinais de resposta devido aos fenômenos de reflexão e transmissão. 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). De forma similar, o sinal emitido pela porta 2 também é analisado devido aos fenômenos de reflexão $|S_{22}|^2$ e transmissão $|S_{12}|^2$.

Figura 4- Representação esquemática dos sinais referentes ao parâmetro S dentro de um guia de onda.



Fonte: Lopes. (2020).

As energias refletidas, transmitidas e absorvidas podem ser descritas conforme as equações 5, 6, 7 para quantificar a refletância R , transmitância T e absorvância A de um determinado material. Além desses parâmetros, é importante analisar a energia devido a absorção efetiva (A_{eff}) que representa o quanto de energia o material absorveu efetivamente da onda eletromagnética (M. Mishra et al., 2013) e que pode ser expressa como na equação 8.

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

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

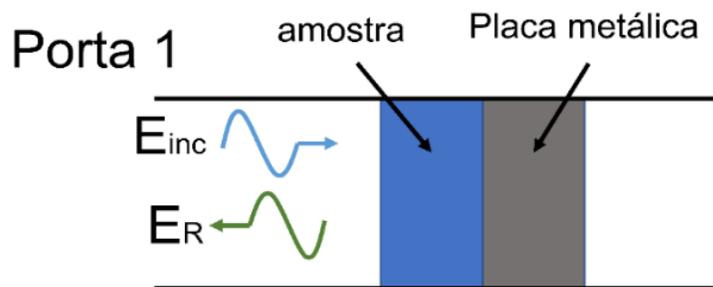
$$A = 1 - R - T \quad (7)$$

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

3.2.3 Ensaio de refletividade

O ensaio da refletividade (RL) é realizado de forma semelhante ao método NRW, no entanto neste ensaio é colocado uma placa metálica atrás da amostra que está sendo analisada impedindo que ocorra o fenômeno de transmissão da radiação, a Figura 5 demonstra uma representação do ensaio da RL.

Figura 5- Representação esquemática do método de refletividade.



Fonte: Lopes. (2020).

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 5 (da Silva et al., 2009). A relação entre a atenuação da radiação e a porcentagem de energia absorvida conforme a equação 5 é apresentada na Tabela 1.

$$RL(dB) = 10 \log_{10} \left(\frac{E_r}{E_i} \right) \quad (5)$$

Tabela 1- 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: Lopes. (2020).

Segundo descrito na literatura, o comportamento de refletividade (RL) da radiação eletromagnética também pode ser definida em relação a impedância intrínseca do material, conforme descrito pelas equações 6 e 7.

$$RL(dB) = 20 \log_{10} \left| \frac{\eta_{in} - 1}{\eta_{in} + 1} \right| \quad (6)$$

$$\eta_{in} = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \tanh \left(\frac{2\pi f}{c} t \sqrt{\mu\varepsilon} \right) \quad (7)$$

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 6 e 7, 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 6 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 7. E com isso, é possível aumentar o potencial de absorção e melhor eficiência na proteção de dispositivos eletrônicos (MENG, 2009/ LOPES, 2020).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Processamento do material compósito

Neste trabalho foram produzidas amostras de compósitos híbridos, onde foram adicionados particulados elétricos e particulados magnéticos em uma matriz dielétrica. Como matriz do compósito, foi utilizado a borracha de silicone branco e os particulados usados foram: o grafite, a ferrita manganês e zinco e a ferro carbonila.

Para análise e comparação, foi adicionado a mesma quantidade de particulado magnético (FeMnZn e FC) em todas as amostras e variou-se apenas a quantidade do particulado elétrico (grafite). As composições de cada amostra, em relação ao peso, estão descritas na Tabela 2.

Tabela 2- Composição das amostras.

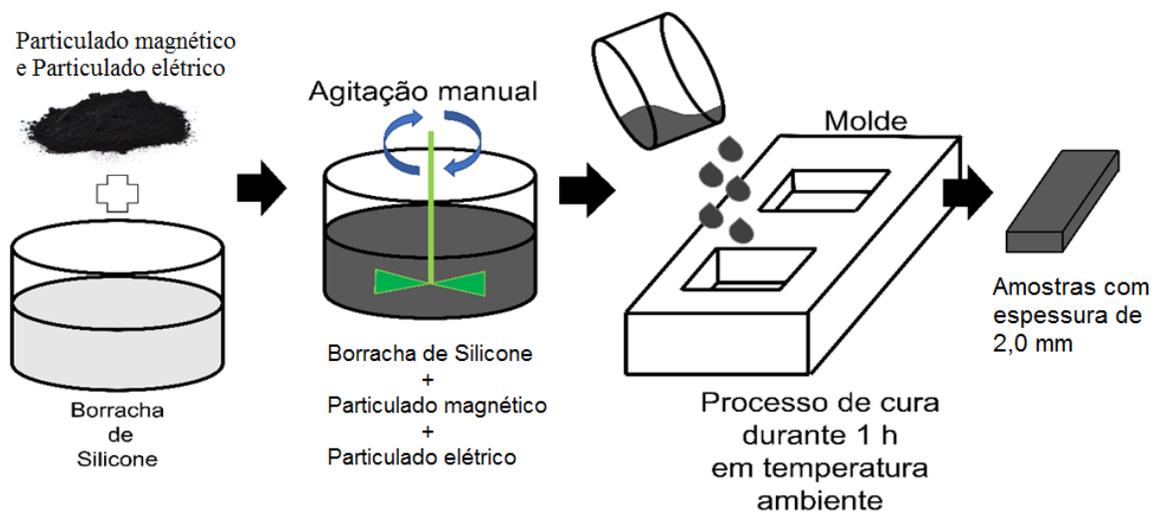
| COMPOSIÇÃO | | | | |
|-------------------|---------|----------|------------------|----------|
| Aditivo Magnético | | | Aditivo Elétrico | |
| | % Massa | % Volume | % Massa | % Volume |
| FeMnZn | 70 | 37,6 | 1 | 1,2 |
| | 70 | 39 | 5 | 6,3 |
| | 70 | 40,8 | 10 | 13,3 |
| | 70 | 42,9 | 15 | 21 |
| FC | 70 | 28,4 | 1 | 1,4 |
| | 70 | 29,6 | 5 | 7,3 |
| | 70 | 31,2 | 10 | 15,5 |
| | 70 | 33 | 15 | 24,6 |

Fonte: Produção do autor.

O processamento das amostras foi dividido em 4 etapas, determinação da composição dos compósitos, homogeneização da composição devido a agitação, conformação das amostras em um molde, e obtenção do material compósito, conforme demonstrado na Figura 6. A primeira etapa é referente ao controle da composição dos compósitos conforme a Tabela 2, a quantidade de cada material foi aferida utilizando uma balança analítica modelo FA-2204 da empresa SCALE com 4 casas decimais afim de garantir com precisão a variação de cada componente. Como referência em peso, inicialmente, foi adicionado cerca de 1 grama de silicone e a partir dessa massa, foram calculadas as quantidades em peso necessário de cada tipo de particulado conforme descrito na Tabela 2. Posteriormente ao controle da proporção

dos particulados e do silicone, foi realizada a segunda etapa referente a uma agitação manual de 2 minutos até visível homogeneização do sistema particulado elétrico/particulado magnético/silicone. Paralelamente a essa etapa, o processo de cura foi realizado utilizando o catalizador na proporção conforme indicado pelo fabricante do silicone. A proporção de catalizador foi de 5% em relação ao peso de silicone. A terceira etapa consiste no processo de cura do silicone, que foi realizado em temperatura ambiente no interior de um molde impresso em impressora 3D marca Creality modelo CR-10 com precisão dimensional de 0,1 mm. E para finalizar, a quarta etapa consiste na obtenção das amostras com dimensões semelhantes à do guia de onda retangular acoplado ao analisador de rede vetorial, de 22,9 mm x 10,2 mm, e a espessura das amostras escolhida foi de 2,0 mm.

Figura 6- Etapas do processamento das amostras.



Fonte: adaptado de Lopes. (2020).

4.2. Caracterização estrutural e morfológica

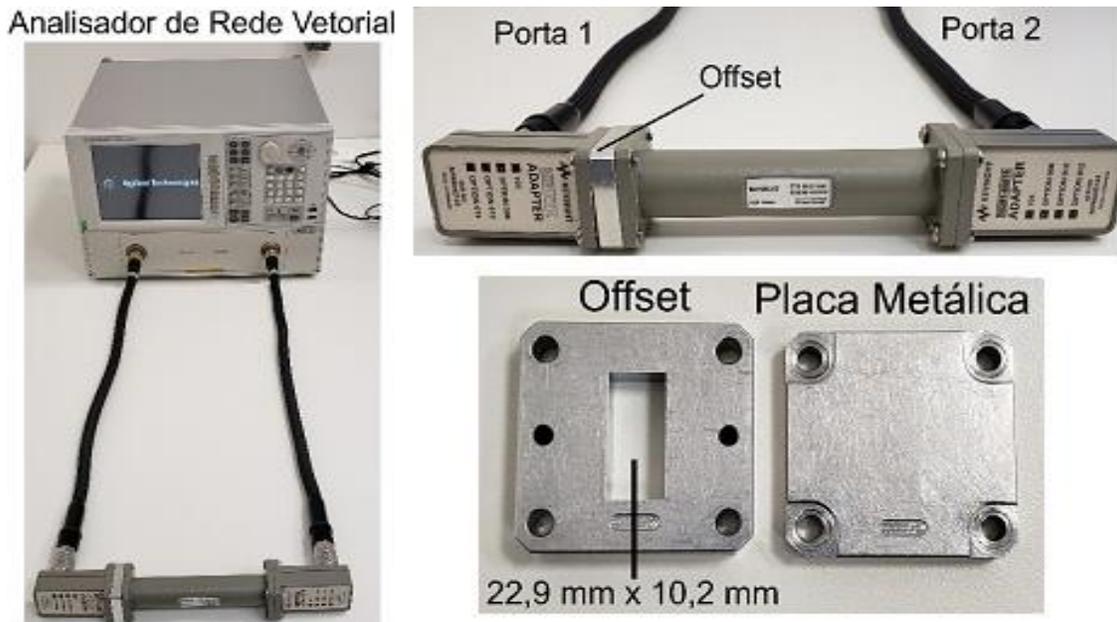
A primeira etapa do trabalho consistiu em caracterizar a estrutura cristalina e a morfologia de cada particulado utilizado nas amostras. Para a análise estrutural, utilizou-se um Difratorômetro de Raio X (DRX) modelo X'Pert PRO da empresa PanAnalytic utilizando um eletrodo de Cobre - Cu K α , com comprimento de onda de 1,56 Å. Durante a caracterização

morfológica foi utilizado um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) acoplado a um canhão de emissão de campo ou também conhecido pela sigla em inglês como FEG (*photon emission gun*), modelo Mira 3 da empresa TESCAN.

4.3. 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. A faixa de frequência analisada foi de 8,4 GHz a 12,4 GHz, referente a banda X. A Figura 7 apresenta o VNA e os seus componentes como cabos transmissões (porta 1 e porta 2) e os adaptadores acoplados aos cabos. Na Figura 7, 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 7- Componentes do sistema de caracterização eletromagnética.



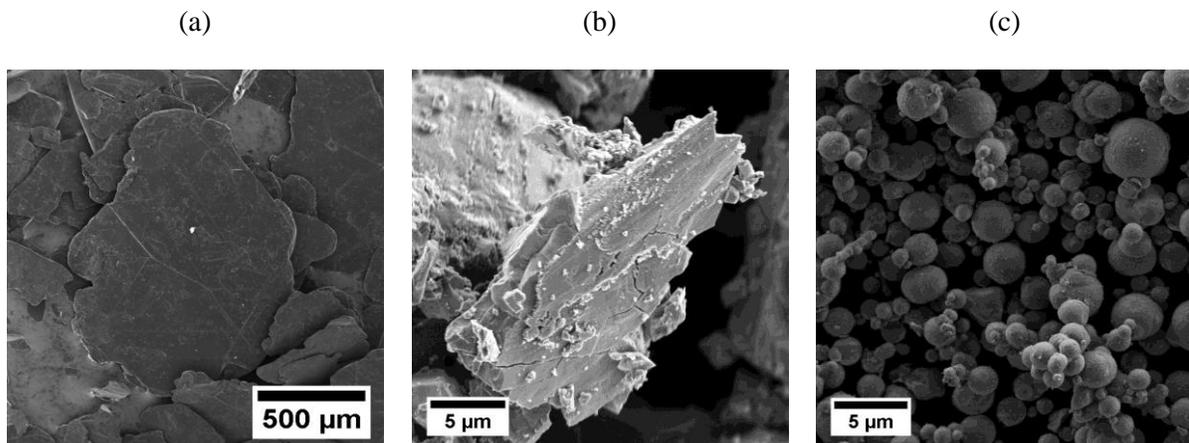
Fonte: Lopes. (2020).

5. ANÁLISES E RESULTADOS

5.1 Caracterização morfológica

A Figura 8 apresenta a caracterização morfológica dos materiais utilizados realizada no MEV. A Figura 8(a) mostra que as partículas do grafite comercial têm formato de placas, com uma largura de aproximadamente 500 μm . A FeMnZn possui particulados com a morfologia semelhante ao do grafite, porém menores com largura de aproximadamente 20 μm , como apresentado na Figura 8(b). A ferro carbonila possui os particulados em formato de micro esferas, com diâmetros inferiores a 5 μm demonstrado na Figura 8(c).

Figura 8- MEV dos particulados de (a) grafite, (b) FeMnZn e (c) FC.



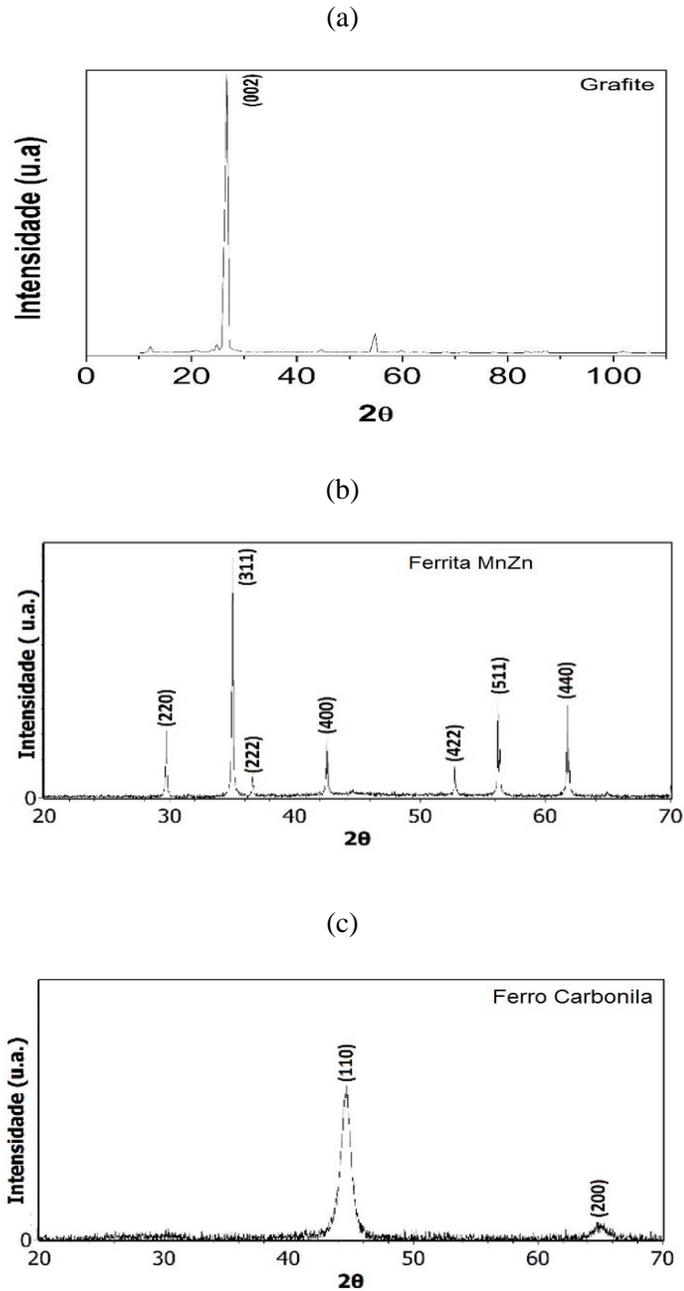
Fonte: Produção do autor.

5.2 Caracterização estrutural

O DRX foi realizado afim de determinar a estrutura cristalina de cada material. A presença de um pico em 26,6° no plano 002, apresentado na Figura 9(a), indica uma característica de um grafite puro (Chen et al., 2017). A Figura 9(b) indica que a ferrita possui uma estrutura espinélio, isso é demonstrado de acordo com os picos encontrados em 29,72°, 35,00°, 36,61°, 42,52°, 52,88°, 56,38° e 61,62°, referentes aos planos 220, 311, 222, 400, 422, 511 e 440, respectivamente (Rath et al., 1999). Para a ferro carbonila os picos estão localizados em

44,79° e 66,28°, correspondentes aos planos 110 e 200 respectivamente, isso indica que o material tem uma estrutura cubica de corpo centrado (CCC) (Yang et al., 2018).

Figura 9- Difratomia de raio X.



Fonte: Produção do autor.

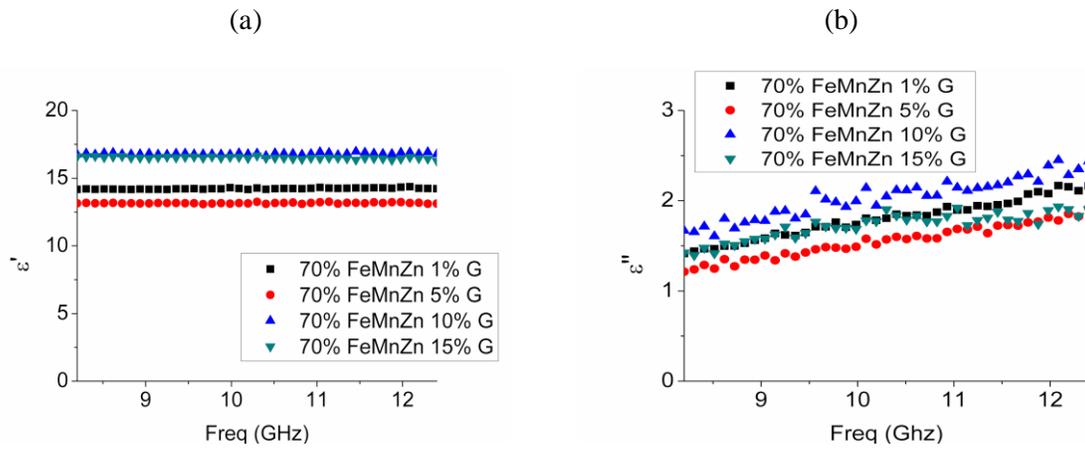
5.3 Caracterização eletromagnética

A caracterização eletromagnética realizada nas amostras foi feita a partir da análise da permissividade, da permeabilidade e das tangentes de perda elétrica e magnética do material, com o objetivo de verificar o comportamento destas propriedades ao aumentar a proporção do grafite. Posteriormente, foram analisados os parâmetros A, R, T e A_{eff} obtidos com o método NRW. E por fim, foi analisado o potencial de absorção das amostras devido ao método da refletividade e a partir disto, foi possível realizar uma simulação deste potencial para diferentes espessuras considerando a descrição matemática das equações 6 e 7.

5.3.1 Propriedades do compósito de ferrita manganês e zinco com grafite

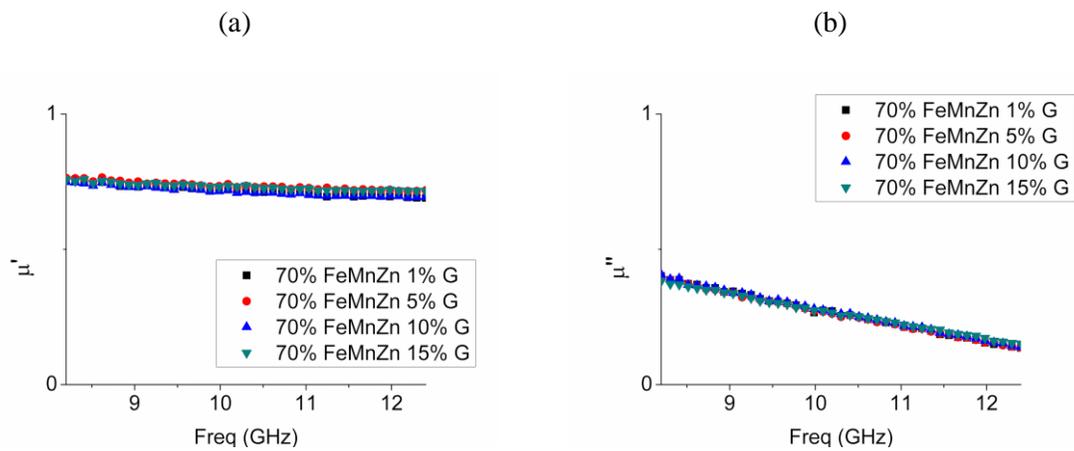
A permissividade elétrica das amostras de FeMnZn com grafite foram calculadas utilizando o VNA. De acordo com os resultados demonstrados na Figura 10, o aumento da proporção de grafite gerou um aumento considerável de aproximadamente 18 % na parcela capacitiva da permissividade. A parcela real ϵ' variou entre os valores 14 para 16,5, referentes as amostras com 5% de grafite e da amostra com 15% de grafite, respectivamente. A parcela imaginária ϵ'' demonstrou uma pequena alteração com o aumento da frequência, atingindo um valor máximo de 2,4 em 12,4 GHz. A Figura 11 apresenta as curvas de permeabilidade das amostras de FeMnZn, onde é possível observar que os valores de permeabilidade μ' e μ'' não apresentaram uma variação na faixa de frequência analisada, demonstrando que o grafite não apresenta caráter magnético. Devido a essa influência do grafite nas propriedades elétricas e magnéticas, é possível observar que o grafite representou uma pequena queda nos valores de tangentes de perdas elétricas. Com isso, é possível observar que o grafite aumentou a capacidade do compósito de FeMnZn em absorver a energia da radiação incidente devido a fenômenos capacitivos. Em paralelo, o grafite apresentou nenhuma variação na tangente de perda magnética, conforme demonstrado na Figura 12, o que já era esperado pois o material grafite não apresenta propriedades magnéticas conforme a literatura (Xu et al., 2015).

Figura 10- Permissividade (a) real e (b) imaginária dos compósitos híbridos de FeMnZn e grafite.



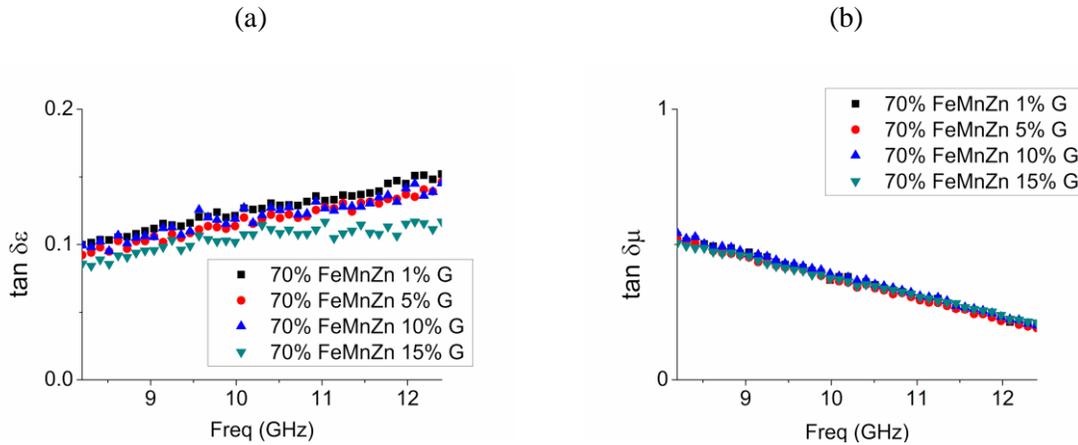
Fonte: Produção do autor.

Figura 11- Permeabilidade (a) real e (b) imaginária dos compósitos híbridos de FeMnZn e grafite.



Fonte: Produção do autor.

Figura 12- Tangente de perda (a) elétrica e (b) magnética dos compósitos híbridos de FeMnZn e grafite.

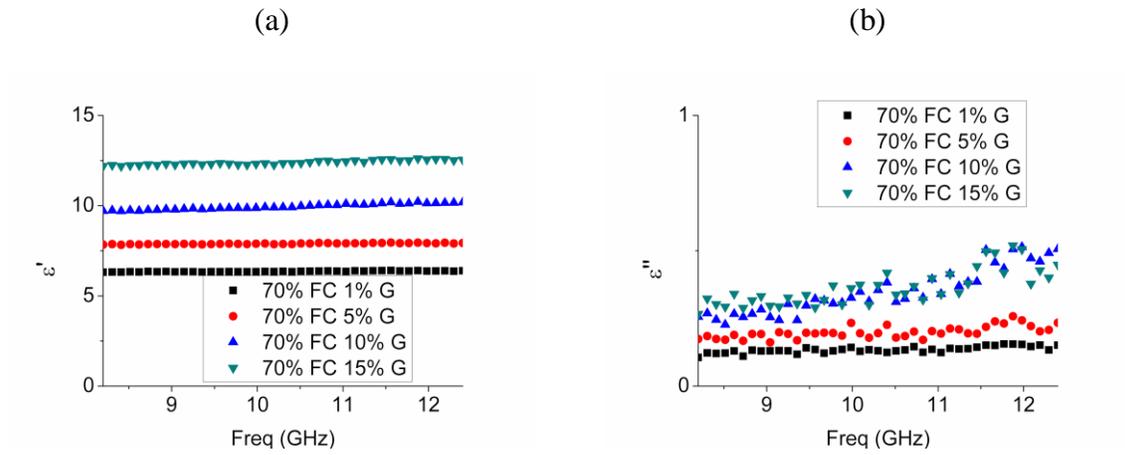


Fonte: Produção do autor.

5.3.2 Propriedades do compósito de ferro carbonila com grafite

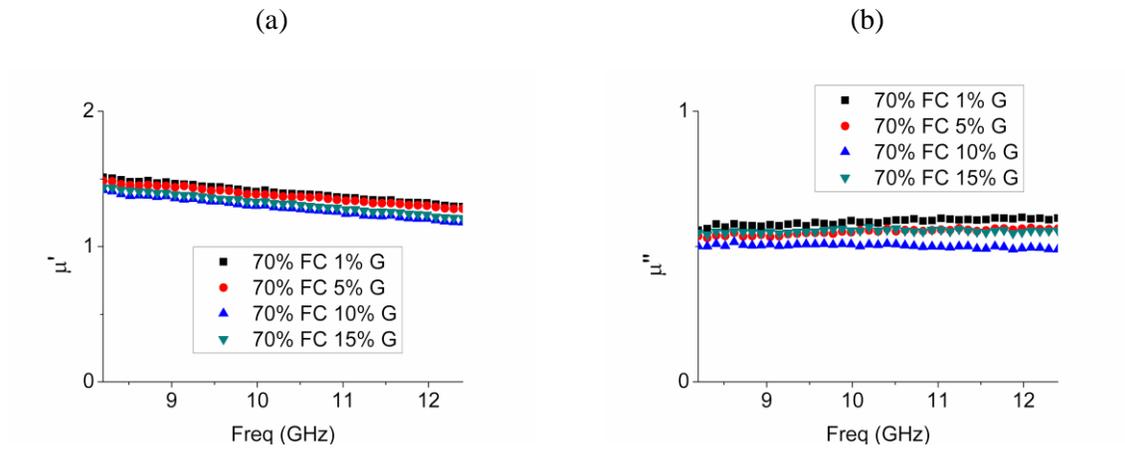
O aumento da proporção de grafite dobrou a parcela capacitiva da permissividade. Conforme apresenta a Figura 13, o ϵ' variou de 6,3 para 12,6 nas amostras de 1% de grafite e 15% de grafite respectivamente, e a parcela dissipativa, referente ao ϵ'' teve uma variação maior nas frequências de 12,4 GHz, mas permaneceu entre 0,1 e 0,4. A Figura 14 demonstra que a alteração da composição gerou uma pequena queda na parcela real μ' e na parcela imaginária μ'' da permeabilidade magnética. De acordo com essas propriedades foi possível calcular as tangentes de perda elétrica e magnética, conforme a Figura 15. A tangente de perda elétrica teve um aumento com maiores quantidades de grafite, no entanto o maior valor encontrado foi de 0,055 ($\delta_\epsilon \approx 3,1$) e este valor não é suficiente para alterar o caráter capacitivo do material (LOPES, 2020). De forma semelhante aos compósitos de FeMnZn com grafite, os compósitos produzidos com a FC também não tiveram alteração na tangente de perda magnética.

Figura 13- Permissividade (a) real e (b) imaginária dos compósitos híbridos de FC e grafite.



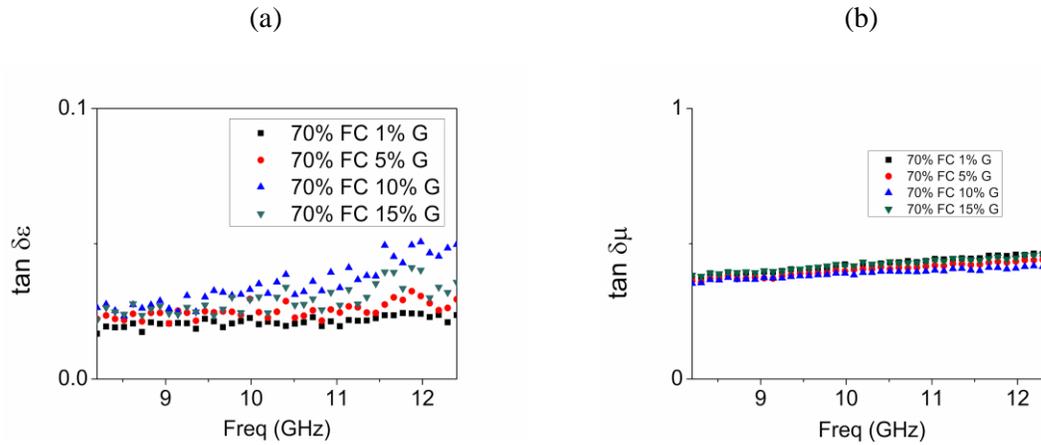
Fonte: Produção do autor.

Figura 14- Permeabilidade (a) real e (b) imaginária dos compósitos híbridos de FC e grafite.



Fonte: Produção do autor.

Figura 15- Tangente de Perda (a) elétrica e (b) magnética dos compósitos híbridos de FC e grafite.



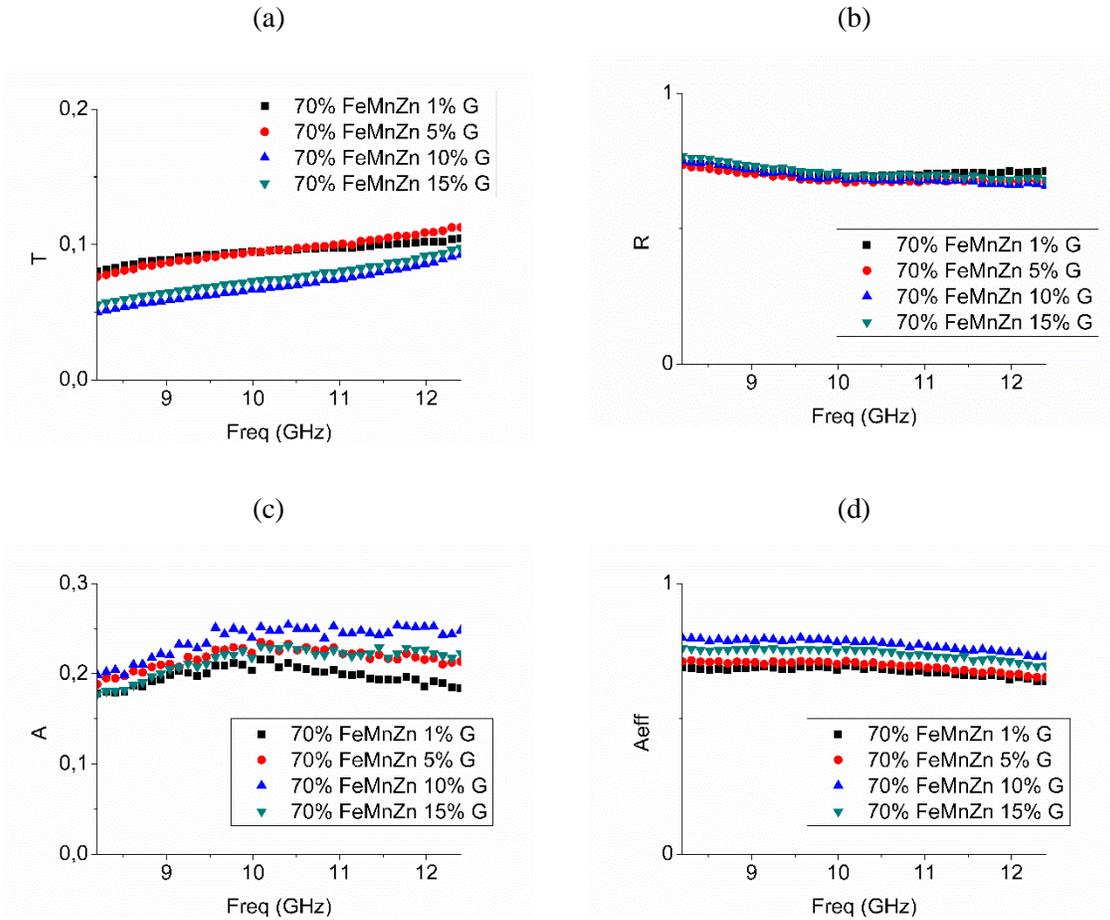
Fonte: Produção do autor.

5.3.3 Comportamento eletromagnético dos compósitos de ferrita manganês e zinco com grafite e dos compósitos de ferro carbonila com grafite.

Os comportamentos eletromagnéticos dos compósitos de FeMnZn e grafite estão demonstrados na Figura 16 e foram obtidos a partir do Parâmetro S e das equações 5, 6, 7 e 8. Na Figura 16(a) é verificado que o aumento da proporção de grafite proporcionou uma pequena diminuição do fenômeno de transmissão do compósito. A Figura 16(b) é referente a reflexão, e como pode ser observado, não obteve valores muito diferentes ao aumentar a proporção de grafite, apresentando um valor de 0,7. As Figuras 16(c) e (d) apresentam o potencial de absorção e a absorção efetiva respectivamente e como pode ser observado, o aumento de grafite resultou em uma queda para estes parâmetros.

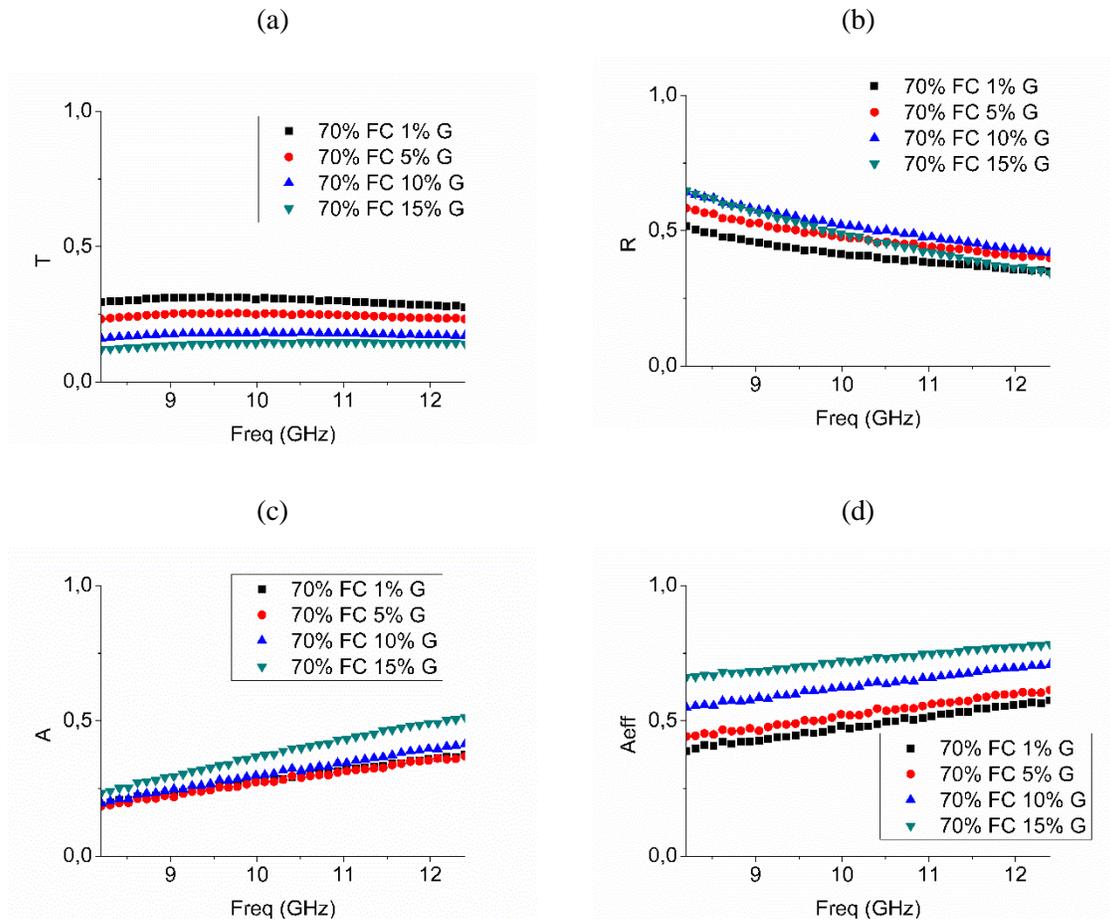
Na Figura 17 é apresentado os mesmos parâmetros para os compósitos de ferro carbonila com grafite. Ao comparar as Figuras 16 e 17 é possível perceber que os compósitos de ferro carbonila apresentaram maior alteração com o aumento da proporção de grafite.

Figura 16- Comportamento eletromagnético das amostras de FeMnZn e Grafite. (a) Transmissão, (b) Reflexão, (c) Absorção e (d) Absorção efetiva.



Fonte: Produção do autor.

Figura 17- Comportamento eletromagnético das amostras de FC e Grafite. (a) Transmissão, (b) Reflexão, (c) Absorção e (a) Absorção efetiva.



Fonte: Produção do autor.

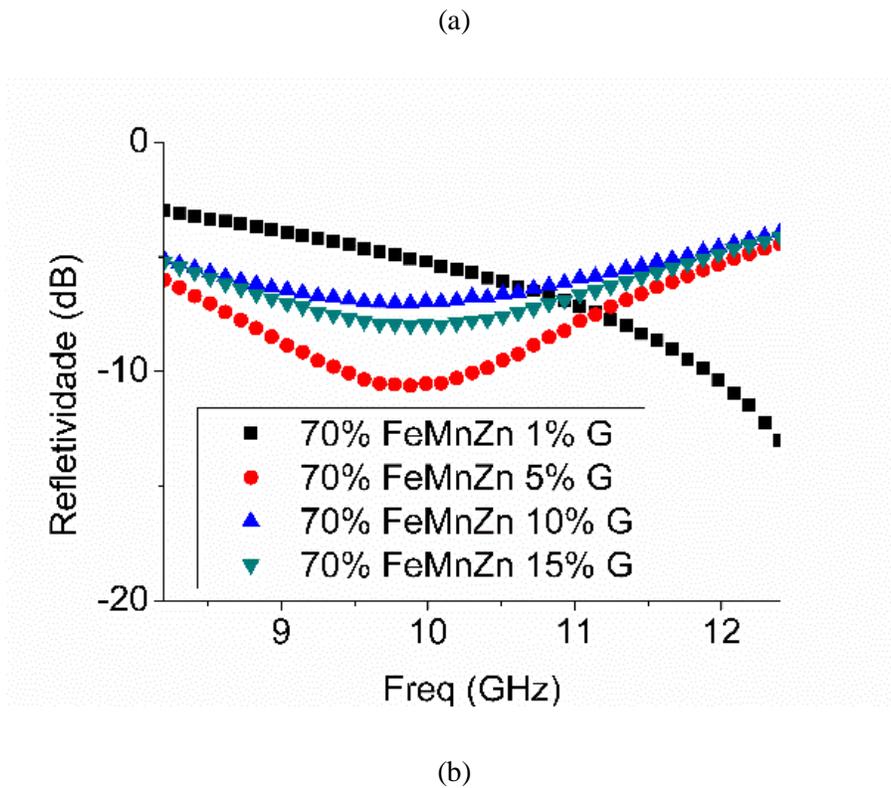
5.3.5 Ensaio de Refletividade

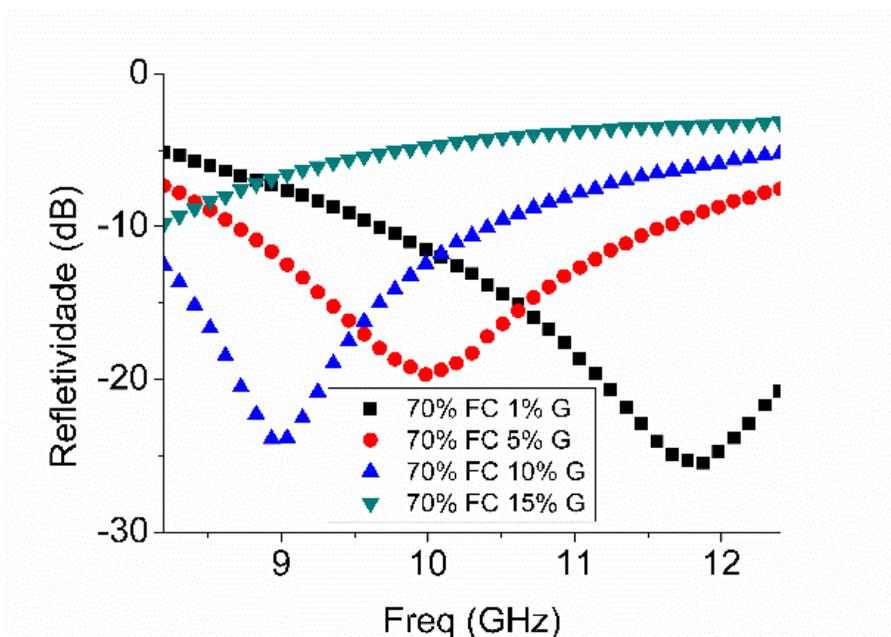
O ensaio da refletividade realizado com a placa metálica atrás das amostras, demonstraram resultados interessantes. Na Figura 17(a) é possível observar que os compósitos de FeMnZn com 5, 10 e 15% de grafite apresentaram um pico de absorção em 9,8 GHz, alcançando valores de -10,6 dB ($\approx 91,3$), -7 dB (≈ 80) e -8 dB ($\approx 84,1$) respectivamente. Na amostra com 1% de grafite o pico de absorção apresentou tendência em ocorrer em uma frequência maior que a Banda X. Os compósitos com FC demonstraram picos de atenuação em diferentes

frequências. A Figura 17(b) demonstra picos em 9,1 GHz com -23,2 dB ($\approx 99,5$) para a amostra com 10%, em 10,1 GHz com -19,4 dB ($\approx 98,8$) para a amostra com 5%, e em 11,9 GHz com -24,9 dB ($\approx 99,7$) para a amostra com 1%.

O aumento do potencial de absorção dos compósitos, tanto a base de ferrita quanto de ferro carbonila, apresentaram uma considerável variação no potencial de blindagem e na frequência de absorção. Este fato pode ser relacionado com a variação nos valores das propriedades de permissividade e permeabilidade dos materiais descritos nos tópicos 5.3.1 e 5.3.2. A variação nas propriedades apresentaram influencia no potencial de absorção conforme previamente descrito nas equações 6 e 7, onde a variação dos parâmetros μ e ϵ gera uma variação nos parâmetros t e f . Porém como as amostras apresentam a mesma espessura t de 2,0 mm, o parâmetro f teria que variar, como demonstrado nas figuras 17 e 18.

Figura 18- Refletividade das amostras de (a) FeMnZn com grafite e (b) FC com grafite.



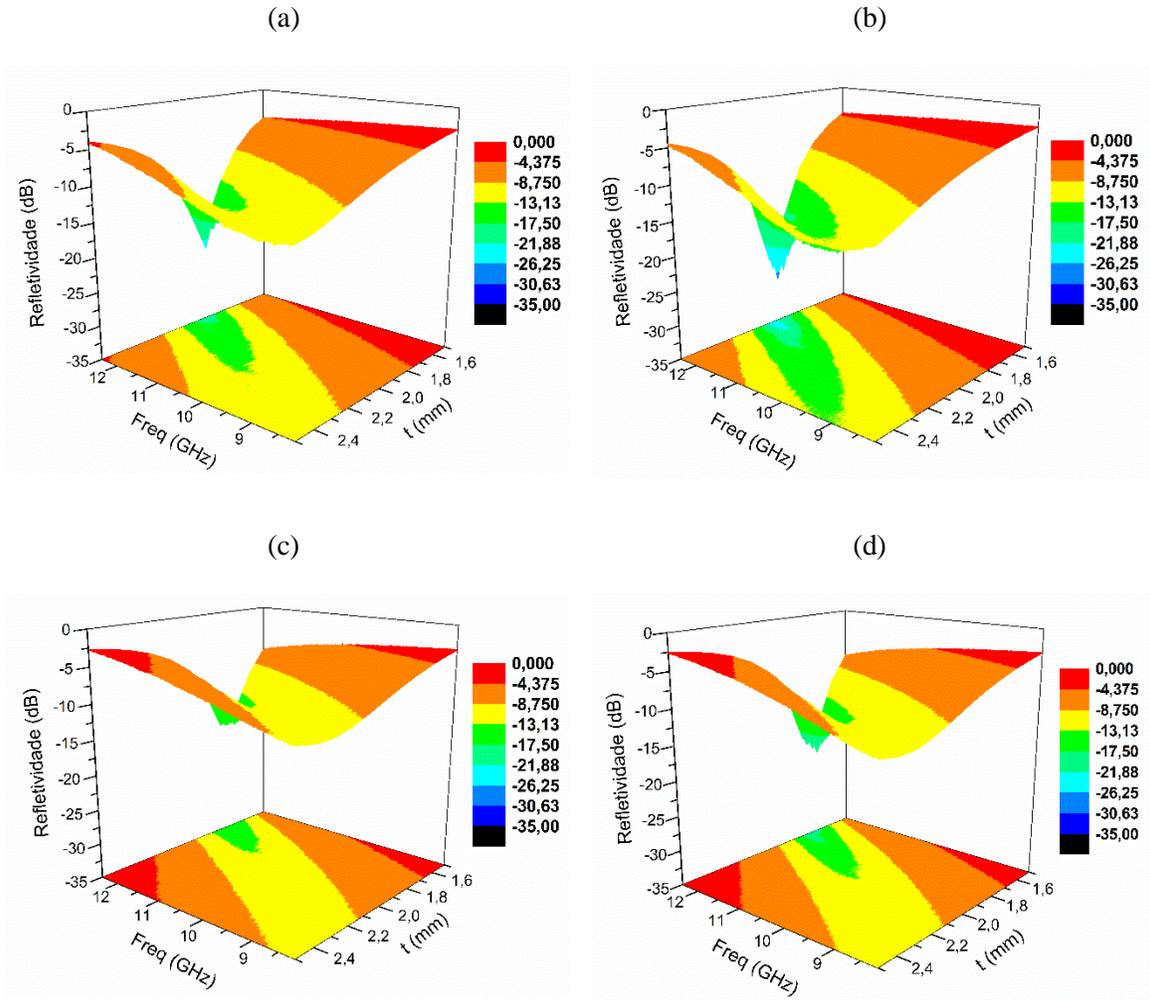


Fonte: Produção do autor.

5.3.6 Simulação do potencial de absorção dos compósitos de ferrita manganês e zinco com grafite

A Figura 19 apresenta o potencial de absorção das amostras em diferentes espessuras. Os gráficos foram construídos em função da frequência e da espessura, a partir das equações 6 e 7. As espessuras analisadas variaram entre 1,5 mm a 2,5 mm. Os resultados demonstram que as amostras de FeMnZn com 1 e 5% de grafite apresentaram maior potencial de absorção com espessuras próximas a 2 mm. As amostras com FeMnZn com 1% de grafite apresentaram um pico de -23dB em 12,37 GHz, como apresentado na Figura 19(a). Na Figura 19(b) as amostras de FeMnZn com 5% de grafite demonstraram um pico com atenuação de -25,3 dB em 12,1 GHz.

Figura 19- Potencial de absorção simulado referente as amostras de (a) FeMnZn + 1%G, (b) FeMnZn + 5%G, (c) FeMnZn + 10%G e (d) FeMnZn + 15%G.

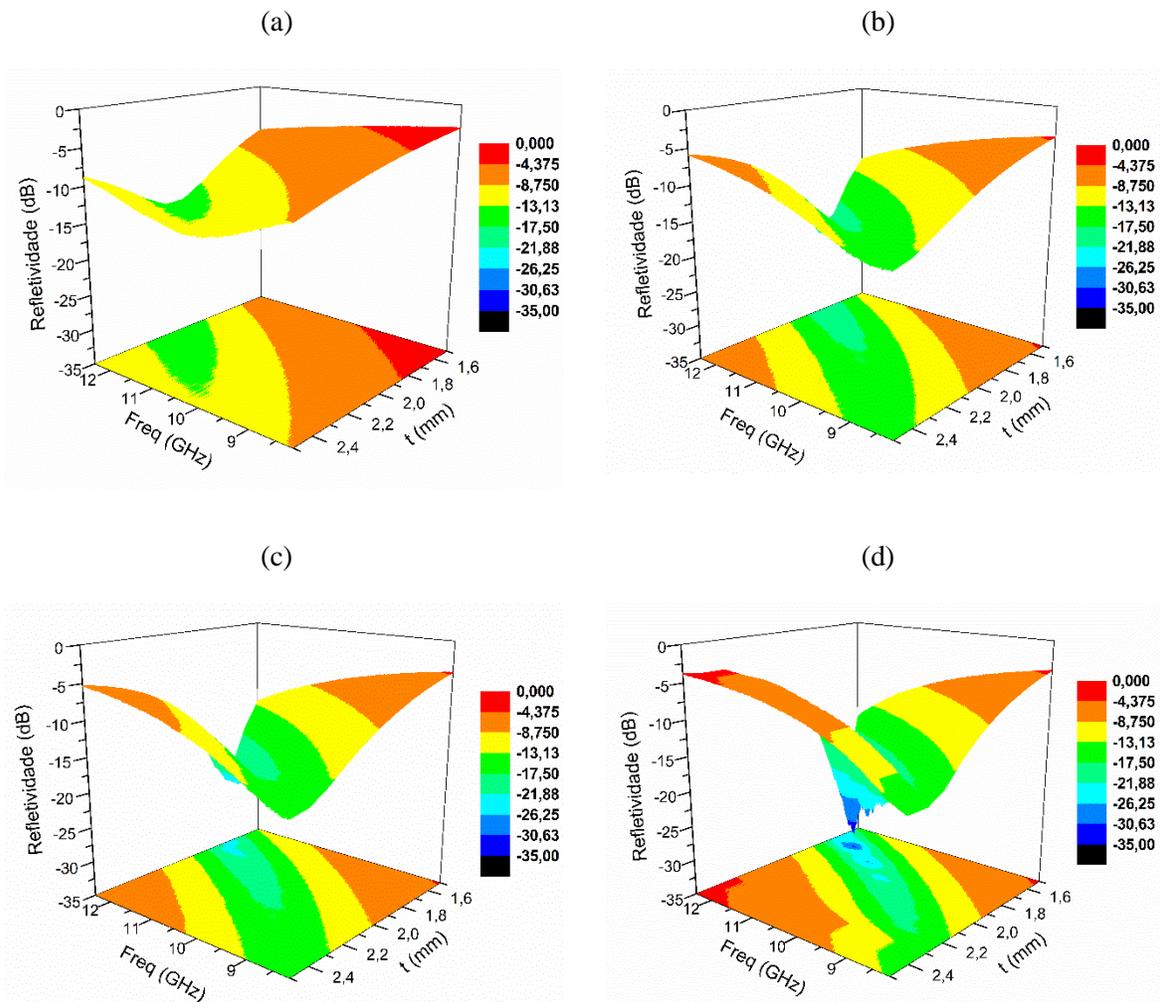


Fonte: Produção do autor.

5.3.7 Simulação do potencial de absorção dos compósitos de ferro carbonila com grafite

Os compósitos de FC com grafite demonstraram um ótimo potencial para utilização em MARE, pois com a simulação em diferentes espessuras o compósito foi capaz de absorver até 99,94% da energia incidente. A Figura 20(d) apresenta um pico de -32,5 dB em 11,8 GHz para a amostra de FC com 15% de grafite e espessura de 1,7 mm.

Figura 20- Potencial de absorção simulado referente as amostras de (a) FC + 1%G, (b) FC + 5%G, (c) FC + 10%G e (d) FC + 15%G.



Fonte: Produção do autor.

Como observado nas figuras 19 e 20, a espessura das amostras apresentam grande influência no potencial de absorção da energia da radiação incidente. Desta forma, é possível afirmar que para ambos materiais, FeMnZn e FC, a simulação do comportamento é uma ferramenta de grande auxílio na produção de materiais absorvedores de radiações eletromagnéticas. Pois com esse recurso, é possível economizar tempo e recursos financeiros para prever e posteriormente confirmar grandes valores de absorção (>99% de absorção).

6. CONCLUSÕES

Os compósitos híbridos analisados neste trabalho apresentaram boas propriedades para serem utilizados em blindagem eletromagnética, na faixa de frequência da banda X. O material apresentou propriedades interessantes para o uso em dispositivos aeroespaciais. A adição do grafite nos compósitos de FeMnZn e FC não demonstrou uma variação significativa na estrutura dos compósitos.

Como já era esperado, o aumento da proporção do grafite não alterou as propriedades de permeabilidade real μ' e imaginária μ'' dos compósitos e com isso, manteve-se a capacidade magnética do material. Também foi observado que o grafite aumentou a capacidade de armazenamento elétrico em ambos os materiais, no entanto o compósito de FC e grafite apresentou um aumento relativamente maior.

A partir do método da refletividade, foi observado que a mistura de aditivos elétricos e magnéticos no compósito podem melhorar a atenuação da radiação incidente. O compósito de FC apresentou um pico em 11,9 GHz com -24,9 dB para amostras com apenas 1% de grafite, demonstrando que com pequenas variações na massa específica, devido ao grafite, é possível alcançar altos valores (>90%) de absorção da radiação eletromagnética.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CHEN, Y., NIU, Y., TIAN, T., ZHANG, J., WANG, Y., LI, Y., & QIN, L. C. Microbial reduction of graphene oxide by *Azotobacter chroococcum*. *Chemical Physics Letters*, v. 677, p. 143–147, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2017.04.002>

CHRISTINE, M., SANTOS, D. O. S., ELETRÔNICAS, D., NA, T., DIGITAL, B., & UFG, D. A. *Nanopartículas Magnéticas Funcionalizadas Com Bicamada De Ácido Láurico : Caracterização , Associação De Moléculas*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás - Goiânia - Instituto de Química, 2012

CHUNG, D. D. L. Electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon materials. *Carbon*, v. 39, n. 2, p. 279–285. 2001. Disponível em: [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. 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*, v. 1, n. 2, p. 255–263, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.5028/jatm.2009.0102255263>

GAMA, A. M. *Radiação Eletromagnética À Base De Ferro Carbonila E Silicone*. VIII Simpósio de Guerra Eletrônica, São José dos Campos, 2006.

GAMA, A. M., & REZENDE, M. C. Complex permeability and permittivity variation of carbonyl iron rubber in the frequency range of 2 to 18 GHz. *Journal of Aerospace Technology and Management*, v. 2, n. 1, p. 59–62, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.5028/jatm.2010.02015962>

GONZÁLEZ, M., POZUELO, J., & BASELGA, J. Electromagnetic Shielding Materials in GHz Range. *Chemical Record*, v. 18, n. 7, p. 1000–1009. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/tcr.201700066>

GOMES FILHO, ALBERTO CORREIA ET AL. Estudo da estrutura e propriedades magnéticas de ferritas de Ni²⁺/Zn²⁺ dopadas com Nd³⁺. 2014.

KARIMI, P., OSTOJA-STARZEWSKI, M., & JASIUK, I. Experimental and computational study of shielding effectiveness of polycarbonate carbon nanocomposites. *Journal of Applied Physics*, v. 120, n. 14, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1063/1.4964691>

KLYGACH, D. S., VAKHITOV, M. G., SUVOROV, P. V., ZHEREBTSOV, D. A., TRUKHANOV, S. V., KOZLOVSKIY, A. L., ZDOROVETS, M. V., & TRUKHANOV, A. V. Magnetic and microwave properties of carbonyl iron in the high frequency range. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, v. 490, p. 165493, 2019. Disponível em: <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*, v. 257, n. 3, p. 842–846, 2010. Disponível em: <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. X Band electromagnetic property influence of multi-walled carbon nanotube in hybrid MnZn ferrite and carbonyl iron composites. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 9, n.2, p. 2369–2375, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.12.068>

LOPES, B. H. K. 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). Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2020.

MENG, W., YUPING, D., SHUNHUA, L., XIAOGANG, L., & ZHIJIANG, J. Absorption properties of carbonyl-iron/carbon black double-layer microwave absorbers. *Journal of*

Magnetism and Magnetic Materials, v. 321, n. 20, p. 3442–3446, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2009.06.040>

MIN, D. Thin-thickness and wide-bandwidth microwave absorber with highly aligned carbonyl iron flakes and graphene nanosheets. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, v. 30, n. 18, p. 17119–17127, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10854-019-02058->

MISHRA, M., SINGH, A. P., & DHAWAN, S. K. Expanded graphite-nanoferrite-fly ash composites for shielding of electromagnetic pollution. *Journal of Alloys and Compounds*, v. 557, p. 244–251, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.01.004>

MISHRA, S., KATTI, P., KUMAR, S., & BOSE, S. Macroporous epoxy-carbon fiber structures with a sacrificial 3D printed polymeric mesh suppresses electromagnetic radiation. *Chemical Engineering Journal*, v. 357, p. 384–394, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.09.119>

MORRISON, S. A., CAHILL, C. L., CARPENTER, E. E., CALVIN, S., & HARRIS, V. G. Preparation and characterization of MnZn-ferrite nanoparticles using reverse micelles. *Journal of Applied Physics*, v. 93, p. 7489–7491, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1063/1.1555751>

OGANOV, A. R., HEMLEY, R. J., HAZEN, R. M., & JONES, A. P. Structure, bonding, and mineralogy of carbon at extreme conditions. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, v. 75, p. 47–77, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.2138/rmg.2013.75.3>

PINHO, M. S., LIMA, R. C., SOARES, B. G., & NUNES, R. C. R. Avaliação do desempenho de materiais absorvedores de radiação eletromagnética por guia de ondas. *Polímeros*, v. 9, n. 4, p. 23–26, 1999. Disponível em: <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. Effect of granulometric distribution on

electromagnetic shielding effectiveness for polymeric composite based on natural graphite. *Science and Engineering of Composite Materials*, v. 26, n. 1, p. 531–539, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1515/secm-2019->

RATH, C., SAHU, K. K., ANAND, S., DATE, S. K., MISHRA, N. C., & DAS, R. P. *Preparation and characterization of nanosize Mn } Zn ferrite*. v. 202, p. 77–84, 1999.

RAZA, M. A., WESTWOOD, A., BROWN, A., HONDOW, N., & STIRLING, C. Characterisation of graphite nanoplatelets and the physical properties of graphite nanoplatelet/silicone composites for thermal interface applications. *Carbon*, v. 49, n. 13, p. 4269–4279, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2011.06.002>

RODRIGUES, M. K. DA C. Estudo da viabilização do uso da mistura híbrida ferrocarbonila/ferrita de $\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ como material absorvedor de radiação eletromagnética. 2010. Univerisidade federal do Rio Grande do Norte, 2010.

SHU, R., ZHANG, G., ZHANG, J., WANG, X., WANG, M., GAN, Y., SHI, J., & HE, J. Fabrication of reduced graphene oxide/multi-walled carbon nanotubes/zinc ferrite hybrid composites as high-performance microwave absorbers. *Journal of Alloys and Compounds*, v. 736, p. 1–11, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.11.084>

XU, Y., YAN, Z., & ZHANG, D. Microwave absorbing property of a hybrid absorbent with carbonyl irons coating on the graphite. *Applied Surface Science*, v. 356, p. 1032–1038, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.08.162>

XU, Y., ZHANG, D., CAI, J., YUAN, L., & ZHANG, W. Microwave absorbing property of silicone rubber composites with added carbonyl iron particles and graphite platelet. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, v. 327, p. 82–86, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2012.09.045>

YANG, P., YU, M., FU, J., & LUO, H. *Rheological properties of dimorphic magnetorheological gels mixed dendritic carbonyl iron powder*. v. 29, n. 1, p. 12–23, 2018.

Disponível em: <https://doi.org/10.1177/1045389X17692050>