



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA,
INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES



sid.inpe.br/mtc-m21c/2020/03.05.12.48-TDI

**ESTUDO DA CAPACIDADE DE ABSORÇÃO DE ONDA
ELETROMAGNÉTICA POR PARTICULADOS DE
FERRITA MNZN E FERRO CARBONILA DISPERSOS
EM MATRIZ DE BORRACHA DE SILICONE NA FAIXA
DE FREQUÊNCIA REFERENTE À BANDA X (8,2-12,4
GHZ)**

Braulio Haruo Kondo Lopes

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores, orientada pelos Drs. Maurício Ribeiro Baldan, Chen Ying An, e Sandro Fonseca Quirino aprovada em 11 de março de 2020.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/424FS3L>>

INPE
São José dos Campos
2020

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GBDIR)

Serviço de Informação e Documentação (SESID)

CEP 12.227-010

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/7348

E-mail: pubtc@inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE - CEPPII (PORTARIA Nº 176/2018/SEI-INPE):

Presidente:

Dra. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CGCPT)

Membros:

Dra. Carina Barros Mello - Coordenação de Laboratórios Associados (COCTE)

Dr. Alisson Dal Lago - Coordenação-Geral de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CGCEA)

Dr. Evandro Albiach Branco - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (COCST)

Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia e Tecnologia Espacial (CGETE)

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux - Coordenação-Geral de Observação da Terra (CGOBT)

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação - (CPG)

Silvia Castro Marcelino - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Ivone Martins - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

Cauê Silva Fróes - Serviço de Informação e Documentação (SESID)



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA,
INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES



sid.inpe.br/mtc-m21c/2020/03.05.12.48-TDI

**ESTUDO DA CAPACIDADE DE ABSORÇÃO DE ONDA
ELETROMAGNÉTICA POR PARTICULADOS DE
FERRITA MNZN E FERRO CARBONILA DISPERSOS
EM MATRIZ DE BORRACHA DE SILICONE NA FAIXA
DE FREQUÊNCIA REFERENTE À BANDA X (8,2-12,4
GHZ)**

Braulio Haruo Kondo Lopes

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores, orientada pelos Drs. Maurício Ribeiro Baldan, Chen Ying An, e Sandro Fonseca Quirino aprovada em 11 de março de 2020.

URL do documento original:

<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/424FS3L>

INPE
São José dos Campos
2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Lopes, Braulio Haruo Kondo.

L881e Estudo da capacidade de absorção de onda eletromagnética por particulados de ferrita MnZn e ferro carbonila dispersos em matriz de borracha de silicone na faixa de frequência referente à banda X (8,2-12,4 GHz) / Braulio Haruo Kondo Lopes. – São José dos Campos : INPE, 2020.

xxiii + 107 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21c/2020/03.05.12.48-TDI)

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

Orientadores : Dr. Maurício Ribeiro Baldan, Dr. Chen Ying An, e Dr. Sandro Fonseca Quirino.

1. Materiais Compósitos. 2. Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética. 3. Ferrita MnZn. 4. Ferrocarbonila. 5. Caracterização Eletromagnética I.Título.

CDU 661.872:620.1



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

Aluno (a): *Braulio Haruo Kondo Lopes*

Título: "ESTUDO DA CAPACIDADE DE ABSORÇÃO DA ONDA ELETROMAGNÉTICA DE PARTICULADOS DE FERRITA MnZn E FERRO CARBONILA DISPERSOS EM MATRIZ DE BORRACHA DE SILICONE NA FAIXA DE FREQUENCIA REFERENTE A BANDA X (8,2-12,4 GHz)."

Aprovado (a) pela Banca Examinadora em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de **Mestre** em **ETE/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores**

Dr. Maurício Ribeiro Baldan



Presidente / Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

Participação por Video - Conferência

Aprovado Reprovado

Dr. Chen Ying An



Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

Participação por Video - Conferência

Aprovado Reprovado

Dr. Sandro Fonseca Quirino



Orientador(a) / Sem Vínculo / São José dos Campos - SP

Participação por Video - Conferência

Aprovado Reprovado

Dr. Sergio Luiz Mineiro



Membro da Banca / INPE / São José dos Campos - SP

Participação por Video - Conferência

Aprovado Reprovado

Este trabalho foi aprovado por:

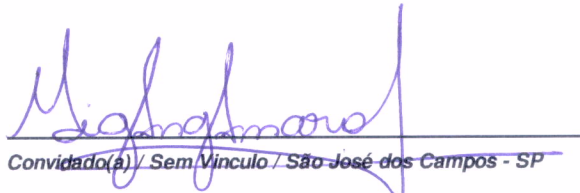
maioria simples

unanimidade

São José dos Campos, 11 de março de 2020

Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de **Mestre** em
**ETE/Ciência e Tecnologia de Materiais e
Sensores**

Dr. Miguel Angelo Amaral Junior



Convidado(a) / Sem Vínculo / São José dos Campos - SP

Participação por Video - Conferência

Aprovado Reprovado

Este trabalho foi aprovado por:

maioria simples

unanimidade

São José dos Campos, 11 de março de 2020

“Acreditar é a força que nos permite subir os maiores degraus na escada da vida”

Autor desconhecido.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço à Deus por me guiar por um caminho onde eu tenha a oportunidade de sempre ser uma pessoa melhor.

Agradeço aos meus pais, Afonso de Oliveira Lopes e Alice Sumie Kondo de Oliveira Lopes, por sempre acreditarem em mim e por todo o apoio e suporte nos momentos difíceis que enfrentei ao longo do meu mestrado.

Agradeço aos meus colegas colaboradores do meu grupo de pesquisa, Roberto C. Portes, Diego E. Florez Vergara, Matheus C. Bispo, Barbara Pinheiro, Mariany Ludgero, e outros, que sempre me apoiaram e me ajudaram.

Agradeço aos meus orientadores Maurício Ribeiro Baldan, Sandro Fonseca Quirino e Chen Ying An pela paciência e dedicação ao me ajudarem em meu crescimento profissional e no desenvolvimento da minha pesquisa.

À CAPES pelo financiamento econômico e a oportunidade dada para poder desenvolver estudos no Brasil e no INPE.

RESUMO

O crescente número de satélites em operação apresenta como consequência um aumento na ocorrência do fenômeno conhecido como interferência eletromagnética. Este fenômeno pode provocar o mal funcionamento e comprometer a eficiência de dispositivos eletrônicos utilizados no setor aeroespacial. Desta forma é de grande importância a realização de estudos para o desenvolvimento de materiais com a finalidade de proteger os diversos sistemas eletrônicos de satélites através da redução dos sinais espúrios. Os materiais absorvedores de radiação eletromagnética (MARE) apresentam a capacidade de reduzir a quantidade de radiação no interior das estruturas de satélites através do efeito Joule. Os materiais compósitos, a base de matrizes poliméricas com aditivos magnéticos, podem associar a característica de baixo peso dos polímeros com a capacidade de particulados magnéticos em absorver uma parcela da energia de determinadas radiações. Neste estudo foram caracterizadas as propriedades eletromagnéticas de amostras de materiais compósitos, a base de particulados de Ferrita de Manganês e Zinco (MnZn) e ferrocarbonila dispersos em uma matriz de silicone dielétrico. Foram utilizadas cinco concentrações entre 30% e 70 %, em duas espessuras diferentes, 1,5 mm e 2,0 mm. As amostras foram analisadas por Difractometria de Raio X, Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Analisador de Rede Vetorial (VNA). Os resultados referentes ao DRX revelaram que a ferrita de Manganês e Zinco e a ferrocarbonila possuíam respectivamente a estrutura cristalina cúbica tipo espinélio e estrutura cúbica de corpo centrado (CCC). As imagens produzidas por MEV revelaram que a ferrita de Manganês e Zinco e a ferrocarbonila possuem, respectivamente, morfologia de esferas e placas em escala micrométrica. As propriedades eletromagnéticas, permissividade elétrica e permeabilidade magnética, e a capacidade de absorção eletromagnética foram caracterizadas através do VNA. Os resultados demonstraram que a permissividade elétrica, componentes real e imaginária, possuem uma relação direta com o aumento da concentração de particulados. A componente real da permeabilidade magnética apresentou diferentes comportamentos em função da concentração. Para a ferrita MnZn, foi observado uma diminuição, e para a ferrocarbonila um aumento. A variação da espessura demonstrou influência nos valores de permissividade e permeabilidade, porém não alterou sua dependência com relação a concentração de particulados. O ensaio de refletividade apresentou um ótimo valor de absorção na faixa de frequência referente a Banda X. A amostra a base de ferrita MnZn para uma concentração de 60% apresentou um pico de absorção em -17 dB (98% de absorção) em 9,5 GHz. O pico de absorção em -24.8 dB (99,6% de absorção) em 9,6 GHz foi observado para a amostra a base de ferrocarbonila. As comparações entre os valores de tangente de perda elétrica e magnética demonstraram que os fenômenos magnéticos apresentaram uma predominância no sistema de perda de energia, fenômenos estes com caráter capacitivos ($<45^\circ$).

Palavras-chave: Materiais Compósitos. Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética. Ferrita MnZn. Ferrocarbonila. Caracterização Eletromagnética.

**STUDY OF THE ABSORPTION CAPACITY OF THE ELECTROMAGNETIC
WAVE OF FERRITA MnZn AND CARBONYL IRON DISPERSED IN
SILICONE RUBBER MATRIX IN THE FREQUENCY RANGE RELATIVE TO X
BAND (8.2-12.4 GHz)**

ABSTRACT

The increasing number of satellites in operation results in an increase in the occurrence of the phenomenon known as electromagnetic interference. This phenomenon can cause malfunctions and compromise the efficiency of electronic devices used in the aerospace sector. Thus, it is of great importance to carry out studies for the development of materials in order to protect the various electronic satellite systems by reducing spurious signals. Electromagnetic radiation absorbing materials (MARE) have the ability to reduce the amount of radiation inside satellite structures through the Joule effect. Composite materials, based on polymeric matrices with magnetic additives, can associate the low weight characteristic of polymers with the ability of magnetic particles to absorb a portion of the energy of certain radiations. In this study, the electromagnetic properties of composite material samples were characterized, based on Manganese and Zinc Ferrite (MnZn) and ferrocobonyl particles dispersed in a dielectric silicone matrix. Five concentrations between 30% and 70% were used, in two different thicknesses, 1.5 mm and 2.0 mm. The samples were analyzed by X-ray diffractometry, Scanning Electron Microscopy (SEM) and Vector Analysis Analyzer (VNA). The results referring to the XRD revealed that the manganese and zinc ferrite and the ferrocobonyl had the spinel-like cubic crystalline structure and the centered body cubic structure (CCC), respectively. The images produced by SEM revealed that Manganese and Zinc ferrite and ferrocobonyl have, respectively, amorphology of spheres and plates in micrometric scale. The electromagnetic properties, electrical permittivity and magnetic permeability, and the electromagnetic absorption capacity were characterized through VNA. The results showed that electrical permittivity, real and imaginary components, has a direct relationship with the increase in the concentration of particulates. The real component of magnetic permeability showed different behaviors depending on the concentration. For MnZn ferrite, a decrease was observed, and for ferrocobonyl an increase. The thickness variation showed an influence on the permissiveness and permeability values, but did not change its dependence on the particulate concentration. The reflectivity test showed an excellent absorption value in the frequency range referring to Band X. The sample based on MnZn ferrite for a concentration of 60% showed an absorption peak at -17 dB (98% absorption) in 9, 5 GHz. The absorption peak at -24.8 dB (99.6% absorption) at 9.6 GHz was observed for the sample based on ferrocobonyl. The comparisons between the tangent values of electrical and magnetic loss showed that magnetic phenomena had a predominance in the energy loss system, phenomena with capacitive characteristics ($<45^\circ$).

Keywords: Composite Materials. Electromagnetic Radiation Absorber Materials. MnZn Ferrite. Carbonyl Iron. Electromagnetic Characterization.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1 - Geração dos momentos magnéticos atômicos.....	8
Figura 2.2 - Representação de domínios magnéticos e a parede dos domínios.....	8
Figura 2.3 - Material diamagnético	10
Figura 2.4 - Material paramagnético	11
Figura 2.5 - Material ferromagnético com polarização permanente sem aplicação de campo magnético externo.....	11
Figura 2.6 - Material antiferromagnético com alinhamento antiparalelo dos spins.	12
Figura 2.7 - Materiais ferrimagnéticos com íons diferentes em posição antiparalela.....	13
Figura 2.8 - Representação esquemática da magnetização de um material.....	14
Figura 2.9 - Estrutura espinélio com fórmula geral ab_2O_4	15
Figura 2.10 - Estrutura magnetoplumbita, fórmula geral $ab_{12}O_{19}$	16
Figura 2.11 - Estrutura granada natural $mg_3al_2(sio_4)_3$	17
Figura 2.12 - Estrutura perovskita com fórmula geral abo_3	17
Figura 2.13 - Representação de uma célula unitária cúbica de face centrada, do tipo espinélio.....	18
Figura 2.14 - Representação da estrutura da ferro-pentacarbonila.....	20
Figura 2.15 - Processo de purificação da ferro-pentacarbonila	21
Figura 2.16 - Estrutura cúbica de corpo centrado referente a estrutura da ferrocarbonila.	21
Figura 2.17 - Esquematização da reflexão e transmissão de uma onda incidente E_t na interface de dois meios diferentes.....	30
Figura 2.18 - tipos de onda.....	33
Figura 2.19 - Representação esquemática do guia de onda retangular e sua associação a dois pares paralelos de planos de guia de onda.....	33
Figura 2.20 - Condições de contorno do campo magnético para o modo te em um guia de onda retangular.....	34
Figura 2.21 - Representação esquemática dos sinais referentes ao parâmetro s dentro de um guia de onda.	36
Figura 2.22 - Representação esquemática das regiões do guia de onda delimitadas para utilização do método nrw.	37
Figura 2.23 - Fluxograma resumido do método nrw.....	40
Figura 2.24 - Representação esquemática referente a analogia da ligação entre um elétron com o núcleo do átomo proposto por lorentz.	41
Figura 2.25 - Componentes capacitivas e dissipativas da permissividade elétrica $\epsilon(\omega)$ em função da frequência.....	43
Figura 2.26 - Relação da razão entre a parcela real e imaginária da permissividade.....	46
Figura 2.27 - Representação esquemática do método de refletividade.	48
Figura 3.1 - Representação das dimensões das amostras.....	51
Figura 3.2 - Etapas do processamento do material compósito.	53
Figura 3.3 - Componentes do sistema de caracterização eletromagnética.....	54
Figura 3.4 - Fluxograma das etapas desenvolvidas na metodologia.	55
Figura 4.1 - MEV dos particulados de ferrita mnzn.	57
Figura 4.2 - MEV dos particulados de ferrocarbonila.....	57
Figura 4.3 - DRX dos particulados.....	58
Figura 4.4 - Permissividades complexas das amostras de ferrita mnzn com 1,5 mm de espessura.	60

Figura 4.5 - Permissividades complexas das amostras de ferrita mnzn com 2,0 mm de espessura.	61
Figura 4.6 - Permissividades elétricas complexas das amostras de ferrocarbonila com 1,5 mm de espessura.....	64
Figura 4.7 - Permissividades elétricas complexas das amostras de ferrocarbonila com 2,0 mm de espessura.....	65
Figura 4.8 - Permeabilidade magnética complexa das amostras de ferrita mnzn com 1,5 mm de espessura.	68
Figura 4.9 - Permeabilidade complexas das amostras de ferrita mnzn com 2,0 mm de espessura.	69
Figura 4.10 - Permeabilidade complexas das amostras de ferrocarbonila com 1,5 mm de espessura	71
Figura 4.11 - Permeabilidade complexas das amostras de ferrocarbonila com 2,0 mm de espessura	72
Figura 4.12 - Refletividades das amostras de ferrita mnzn.....	74
Figura 4.13 - Refletividades das amostras de ferrocarbonila.....	75
Figura 4.14 - Condutividades efetivas das amostras de ferrita mnzn.....	77
Figura 4.15 - Condutividades efetivas das amostras de ferrocarbonila.....	78
Figura 4.16 - Tangentes de perdas elétrica das amostras de ferrita mnzn.....	80
Figura 4.17 - Tangentes de perdas magnética das amostras de ferrita mnzn.....	81
Figura 4.18 - Tangentes de perda elétrica das amostras de ferrocarbonila.	82
Figura 4.19 - Tangentes de perda magnética das amostras de ferrocarbonila.....	83

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 2.1 - Momento magnético dos cátions de metais de transição isolados.	19
Tabela 2.2 - Condutividade efetiva de alguns materiais.	44
Tabela 2.3 - Relação entre a escala decibel e percentual de energia absorvida.....	48
Tabela 3.1 - Concentrações utilizadas nas preparações das amostras.	52
Tabela 4.1 - Valores médios das permissividades elétricas complexas das amostras de ferrita MnZn.....	62
Tabela 4.2 - Valores médios das permissividades elétricas complexas das amostras de ferrocarbonila.	66
Tabela 4.3 - Valores médios das permeabilidades magnéticas complexas das amostras de ferrita MnZn.....	70
Tabela 4.4 - Valores médios das permeabilidades magnéticas complexas das amostras de ferrocarbonila.	73
Tabela 4.5 - Maiores valores de tangentes de perdas de cada material em cada espessura....	84

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

MnZn	Manganês Zinco
MARE	Materiais Absorvedores de Radiações eletromagnéticas
GHz	Giga Hertz
N	Nitrogênio
C	Carbono
O	Oxigênio
F	Força Aplicada
VNA	<i>Vector Network Analyzer</i> - Analisador de rede Vetorial
DRX	Difratômetro de Raio X
NRW	Nicholson Ross Weir
MEV	Microscópio Eletrônico por Varredura

LISTA DE SÍMBOLOS

χ_m	Susceptibilidade magnética
μ_{ion}	Momento magnético do íon
μ_B	Momento magnético fundamental de Bohr
\uparrow_+, \uparrow_-	Giro frequência para o próton e para o elétron, respectivamente
μ	Permeabilidade magnética complexa
μ'	Parcela capacitiva da permeabilidade magnética
μ''	Parcela dissipativa da permeabilidade magnética
μ_r	Permeabilidade magnética relativa
μ_0	Permeabilidade magnética do vácuo
ε	Permissividade elétrica complexa
ε'	Parcela capacitiva da permissividade elétrica
ε''	Parcela dissipativa da permissividade elétrica
ε_r	Permissividade elétrica relativa
ε_0	Permissividade elétrica do vácuo
ω	Velocidade angular
σ	Condutividade elétrica
σ_{ef}	Condutividade elétrica efetiva
σ_{ac}	Condutividade elétrica em regime alternado
σ_{dc}	Condutividade elétrica em regime constante
δ_ε	Fator de perda elétrica
$\tan \delta_\varepsilon$	Tangente de perda elétrica
δ_μ	Fator de perda magnética
$\tan \delta_\mu$	Tangente de perda magnética
η	Impedância intrínseca
α	Coeficiente de atenuação
β	Coeficiente de propagação
\vec{E}	Campo Elétrico
\vec{H}	Campo Magnético
\vec{D}	Densidade de fluxo elétrico interna

\vec{B}	Densidade de fluxo magnético interno
ρ_v	Densidade de fluxo elétrico ao longo do volume analisado
ω_p	Frequência de plasma
γ	Taxa de relaxação dos portadores de cargas
τ	Tempo de relaxação
\vec{F}_e	Força elétrica
q	Carga do elétron
K	Constante elástica de uma mola
Δl	Deslocamento do comprimento
t	Espessura da amostra
E_{inc}	Campo elétrico incidente
E_r	Campo elétrico refletido
E_t	Campo elétrico transmitido
H_0	Campo magnético incidente
H_r	Campo magnético refletido
H_t	Campo magnético transmitido
I_o	Corrente elétrica do sistema analisado
V_0	Diferença de potencial do sistema analisado
\vec{j}	Corrente elétrica
\vec{M}	Corrente magnética
f_c	Frequência de corte
v	Volume analisado
T	Coefficiente de transmissão
Γ	Coefficiente de reflexão
S_{ij}	Parâmetro S
λ_c	Comprimento de corte do guia de onda
λ	Comprimento de onda

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 FUNDAMENTAÇÃO	7
2.1 Materiais magnéticos.....	7
2.2 Estrutura das ferritas.....	14
2.3 Ferritas de manganês e zinco	18
2.4 Estrutura da ferrocarbonila	19
2.5 Borracha de silicone	21
2.6 Teoria da propagação de onda eletromagnética em meios materiais	22
2.6.1 Propriedades de um determinado meio material	23
2.6.2 Comportamento eletromagnético	25
2.7 Guia de onda	30
2.7.1 Guia de onda retangulares.....	33
2.8 Método Nicolson-Ross-Weir	35
2.9 Propriedades eletromagnéticas.....	40
2.9.1 Modelo de Lorentz	40
2.9.2 Condutividade elétrica em regime alternado	44
2.10 Tangente de perda elétrica e tangente de perda magnética.....	45
2.11 Relação entre a equação de propagação e as propriedades do meio material.	46
2.12 Ensaio de refletividade	47
3 METODOLOGIA	50
3.1 Condições e etapas do processamento do material compósito.....	50
3.2 Caracterização estrutural e morfológica	53
3.3 Caracterização eletromagnética.....	53

4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	56
4.1	Caracterização morfológica	56
4.2	Caracterização estrutural.....	58
4.3	Caracterização eletromagnética.....	59
4.3.1	Permissividade elétrica das amostras de ferrita MnZn.....	59
4.3.2	Permissividade elétrica das amostras de ferrocarbonila.	63
4.3.3	Permeabilidade magnética das amostras de ferrita MnZn.	66
4.3.4	Permeabilidade magnética das amostras de ferrocarbonila	70
4.3.5	Refletividade	73
4.3.6	Condutividade	76
4.3.7	Tangente de perda elétrica e tangente de perda magnética.....	79
5	CONCLUSÃO	85
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87
	APÊNDICE A - ESCALA DECIBEL	97
	APÊNDICE B - TÉCNICA DE CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL	98
	APÊNDICE C - TÉCNICA DE CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA	100
	APÊNDICE D - FICHAS CRISTALOGRÁFICAS	102
	APÊNDICE E - TRABALHOS DESENVOLVIDOS AO LONGO DO MESTRADO	107

1 INTRODUÇÃO

A evolução da tecnologia está transformando a vida da sociedade com cada vez mais impacto e velocidade. Esta transformação vem acompanhada do aumento no número de aparelhos eletroeletrônicos, radares, satélites etc., estes sendo utilizados de forma cada vez mais abrangente (BAI et al., 2018; ZHU et al., 2019b). Contudo, a crescente incorporação destes dispositivos gera uma poluição eletromagnética que traz consigo a preocupação em relação ao seu próprio funcionamento. Haja vista, por exemplo, que as ondas eletromagnéticas necessárias para um sistema podem ser prejudiciais para outro sistema (GU et al., 2018; VARGAS-BERNAL, 2018). No setor espacial a transmissão de dados entre sistemas sofre forte influência das interferências eletromagnética entre dispositivos. A fim de minimizar as perdas de sinais e aumentar a eficiência dos dispositivos, atualmente são utilizados filtros eletromagnéticos para proteção, estes restringem determinadas faixas de frequências e reduzem o fenômeno de interferência (EL MOSTRAH et al., 2019; RANJAN; SUR; PANDLEY, 2019). Estes filtros são compostos por diversas combinações de materiais metálicos condutores e dielétricos. Estes materiais são apresentados em diferentes geometrias com intuito de restringir determinadas faixas de frequências, a exemplo, filtros para a Banda X (8,2 a 12,4 GHz) (GUPTA et al., 2019; KUMARI; BEHERA, 2019).

A transmissão de dados é entendida como um dos principais parâmetros para os dispositivos de comunicação sem fio, radares, redes locais (LIU et al., 2018a), equipamentos médicos (ELHOSENY et al., 2018), e componentes de satélites (GOTO et al., 2019). Esta importância reside no fato que influências neste processo irão gerar uma informação recebida diferente daquela intencionada pelo emissor. O acoplamento de outros sinais, chamados de sinais espúrios, no sistema podem também gerar mal funcionamento em seus componentes. Neste segundo caso a utilização de Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética (MARE) também vem sendo muito aplicada (LIU et al., 2018b; WANG et al., 2019) para auxiliar na proteção da estrutura destes sistemas.

Os MAREs basicamente transformam a radiação incidente em calor que por sua vez é dissipada para a sua vizinhança (DELFINI et al., 2018; WANG et al., 2018a; ISLAM et al., 2018). Uma das formas de produção de materiais com esta capacidade se dá pela incorporação de particulados elétricos e/ou magnéticos em uma matriz polimérica com base na estrutura de materiais compósitos. Esta combinação gera materiais leves e com capacidade de proteção similar aos níveis tradicionais dos metais, porém, com menor densidade mássica (WANG et al., 2018b). Destaca-se ainda como vantagem para estes materiais: resistência a corrosão, fácil processabilidade, baixo custo.

Uma forma de obter os compósitos absorvedores se dá através da adição de particulados metálicos (ZHU et al., 2019a), nanofolhas de grafeno (MENG et al., 2018), negro de fumo (SIMAYEE; MONTAZER, 2018) e nanotubos de carbono (WANG et al., 2019) em uma resina polimérica isolante, que são consideradas particulados elétricos pois não respondem a campo magnético. Outra classe de compósitos que apresentam potencial de uso são os compósitos magnéticos a base de particulados como os óxidos de ferro (SHU et al., 2018; YANG et al., 2019) e a ferrocarbonila (DUAN et al., 2018; YAN et al., 2018b). Em função da interação da onda com os compósitos, os particulados elétricos causam mais o fenômeno de reflexão do que absorção, já os particulados magnéticos causam mais o fenômeno de absorção do que a reflexão (OTT, 2009).

O avanço da tecnologia dos satélites se deu por volta da década de 50, com o primeiro satélite lançado pelos Estados Unidos, (Explorer I) em janeiro de 1958. Basicamente este era composto apenas de um detector de raios cósmicos, quatro sensores de temperatura, um microfone e um transmissor (de 60 miliWatts, operando na faixa de 108,03 MHz) (LUDWIG, 1959). Mais recentemente é possível tomar como exemplo o satélite CBERS 4 (*China-Brazil Earth Resources Satellite*), desenvolvido através de uma cooperação entre Brasil e China com objetivo de monitoramento dos recursos terrestres e do meio ambiente. O CBERS 4 possui um sistema de monitoramento através de quatro câmeras, WFI – Imageador de Amplo Campo de Visão, MUX – Imageador de Média Resolução, IRS – Imageador de Infravermelho e PAN – Imageador de Alta Resolução. As câmeras utilizam transmissores TWTA que utilizam a faixa de

frequência da Banda X (8,2 a 12,4 GHz). Além das câmeras o satélite carrega dispositivos como, antenas, propulsores, sensores de altitude, sensores solares, sensores infravermelhos, totalizando uma carga total de 1980 Kg (carga útil + estrutura) (INPE, 2014). Comparando os dois satélites, é possível identificar um aumento na quantidade de funções que um satélite deve exercer e conseqüentemente mais componentes eletrônico ele deve carregar. A blindagem se tornou cada vez mais necessária para garantir que os sinais recebidos e armazenados pelos componentes não fiquem expostos a interferências de ondas eletromagnéticas externas e/ou internas. As interferências podem ser provenientes de ondas solares, ondas dos polos magnéticos do planeta, e sinais espúrios entre os diferentes dispositivos do próprio satélite (DRAKAKIS et al., 2017; POURZAHEDI et al., 2017). A comparação entre Explorer 1 e o CBERS 4 demonstra que a blindagem eletromagnética se tornou indispensável nos projetos dos futuros satélites (BYCHANOK et al., 2016)

Os satélites desenvolvidos ao longo dos anos podem ser divididos em 4 categorias devido ao seu peso total. Duas categorias com portes maiores, a categoria Mini apresenta peso entre 101 Kg e 500 Kg e a Micro apresenta peso entre 11 Kg e 100 Kg. Outras duas categorias de portes menores, a Nano com peso entre 1 Kg e 10 KG e a Pico que são satélites com peso menor a 1 Kg. Sendo que entre estas categorias, a categoria Nano e a Pico são as que apresentam as maiores quantidades de satélites operantes ao longo dos últimos anos (DEO, 2019). Contudo, mesmo com menor peso, os dispositivos internos apresentam maior performance necessitando de proteções mais eficientes devido a utilização de materiais compósitos mais leves e mais adequados.

Entre as décadas de 80 e 90, iniciou-se o desenvolvimento, em grande escala, de compósitos a base de fibras de carbono em matrizes poliméricas (FOLGUEIRAS; REZENDE, 2009). O grande atrativo deste tipo de material estava na criação de um material com resistência mecânica alta e peso relativamente baixo. Assim, estes materiais possibilitaram a redução de custos como combustível, e mantiveram o desempenho mecânico aceitável e seguro (REZENDE; BOTELHO, 2000). Estudos mais recentes mostram que além da vantagem em relação ao peso, o material aditivo proporciona uma resposta

eletromagnética passível de substituir os metais (JOSEPH et al., 2019; JEDDI; KATBAB; MEHRANVARI, 2019). A partir do início do século XXI, a indústria eletrônica já vem utilizando os compósitos em diversas aplicações, principalmente as que necessitam de baixo peso. Como exemplo destas aplicações pode-se citar: materiais piezelétricos (RAVEENDRAN; SEBASTIAN; RAMAN, 2019), adesivos condutivos (NAM et al., 2018), blindagem eletromagnética (RAMOA et al., 2018), filtros eletromagnéticos (LI et al., 2019), e sensores químicos (ZHANG et al., 2018). Nestas aplicações é possível encontrar diversos tipos de materiais em suas composições, este trabalho destaca a utilização de dois tipos de particulados magnéticos: os óxidos de ferro e a ferrocarbonila.

A primeira aplicação registrada em patente utilizando ferritas em dispositivos eletrônicos foi desenvolvida pelos japoneses Kato e Takei em 1932, no qual o objetivo era reduzir o tamanho dos dispositivos para reduzir volumes (KATO; TAKEI, 1932). A utilização das ferritas tinham como base a ferrita em sistema binário como a $MO \cdot Fe_2O_3$ para aplicações tecnológicas na indústria (SNOEK, 1936). Atualmente é possível encontrar estudos utilizando ferritas para aplicações eletrônicas, porém, com variações em sua estrutura e geometria. A exemplo, alterando a resposta eletromagnética das ferritas através da dopagem dos cátions metálicos (SINGH; BAHREL; NARANG, 2019; GOMES, 2014; SONG et al., 2010), utilizando a geometria de filmes finos (GHASEMI, 2012), manipulando a temperatura de sinterização da estrutura da ferrita (VINAYKUMAR; BERA, 2019), ou alterando a via de processamento para métodos conhecidos como sol-gel (LIU et al., 2019a).

Após a perspectiva de utilização de ferritas em componentes eletrônicos, surgiu a busca por novos materiais. Outro material com propriedades magnéticas relevantes para a aplicação em componentes eletromagnéticos é o ferro em sua forma pura (Fe^0), derivado da decomposição da ferro-pentacarbonila denominado ferrocarbonila (FARIAS, 2006). Este material apresenta capacidade de utilização em vários setores devido as suas propriedades como larga magnetização de saturação, alta temperatura de Curie e largo comprimento de banda para absorção de micro-ondas (ZHANG et al., 2014). A ferrocarbonila já

se encontra em aplicações como indutores, transformadores, entres outros componentes de circuito elétricos (SONEHARA et al., 2017; BIRD, 2009) além do setor alimentício na produção de suplementos nutricionais (FARIAS, 2006). Estudos mais recentes já demonstram a capacidade de se manipular a ferrocbonila, assim como a ferrita, para aumentar o seu desempenho eletromagnético (BAI et al., 2019; LIU et al., 2019b).

Este trabalho tem seu foco o estudo da relação entre a capacidade de absorção, espessura da amostra e concentração de particulados magnéticos dispersos em compósitos a base de ferrita de manganês e zinco (MnZn) e ferrocbonila. Este estudo tem como objetivo proporcionar uma base de dados para apontar quais condições de processamento dos compósitos propostos podem apresentar os maiores índices de absorção. Os resultados são apresentados em funções das permissividades elétricas, permeabilidades magnéticas, índices de absorção, condutividades elétricas, e tangentes de perdas elétricas e magnéticas.

Esta dissertação foi dividida em 5 capítulos, sendo que o Capítulo 2 descreve a fundamentação teórica sobre materiais magnéticos e suas características. Neste Capítulo também é apresentado os três materiais utilizados neste trabalho. Primeiramente, as estruturas cristalinas dos óxidos de ferro com ênfase na ferrita de manganês e zinco. Em Segundo, a estrutura da ferrocbonila junto a seu processo de obtenção, e em terceiro, uma descrição técnica sobre a borracha de silicone. Em continuidade ao Capítulo 2, segue uma breve fundamentação sobre a teoria de propagação de onda, propriedades eletromagnéticas, guia de ondas, método Nicholson Ross Weir, ensaio de refletividade, condutividade elétrica em regime alternados e tangentes de perdas elétricas e magnéticas.

O Capítulo 3 aborda os processos experimentais como a metodologia utilizada na obtenção dos materiais compósitos a base de ferrita e ferrocbonila, evidenciando parâmetros importantes no processamento do compósito. Traz ainda informações sobre as técnicas de caracterizações empregadas para identificação das estruturas cristalinas e morfologias dos particulados, e também a caracterização eletromagnética utilizando o analisador de rede vetorial.

O Capítulo 4 apresenta os resultados relacionados a difratometria de Raio X e microscopia eletrônica por varredura. Este Capítulo também demonstra os

resultados referentes a caracterização eletromagnética através da análise da permissividade elétrica, permeabilidade magnética, potencial de absorção, condutividade e tangente de perda.

O Capítulo 5 é dedicado às conclusões e perspectivas de trabalhos futuros.

Em seguida são apresentados três apêndices. Estes apêndices são referentes a informações sobre a escala decibel, a técnica de caracterização estrutural utilizando um Difrátômetro de Raio X e a técnica de caracterização morfológica utilizando um Microscópio Eletrônico por Varredura.

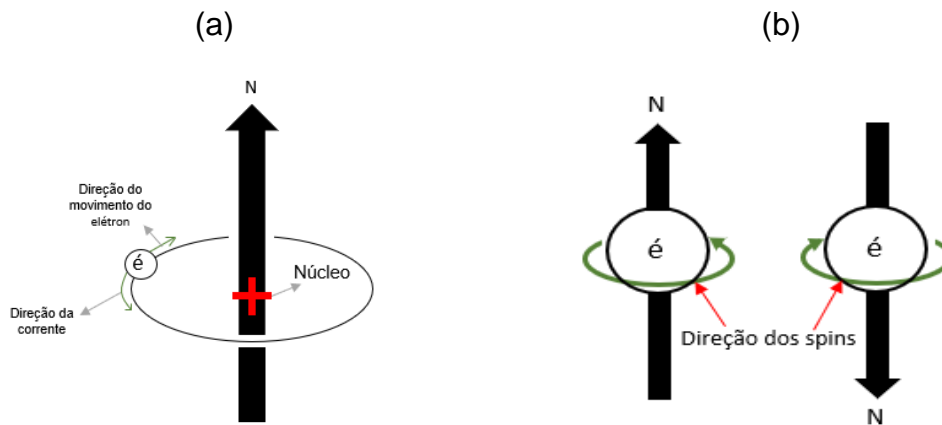
2 FUNDAMENTAÇÃO

2.1 Materiais magnéticos

Os materiais magnéticos despertam a curiosidade humana desde a época da Grécia antiga, em relatos do filósofo Sócrates é possível identificar que este era intrigado pelo magnetismo. Em seus estudos, Sócrates descreve o comportamento de anéis metálicos que eram atraídos por um material, denominado pedra imã, quando colocados a uma determinada distância. Esse comportamento é conhecido como magnetização e a pedra imã capaz de exercer tal força de atração era a magnetita (Fe_3O_4). A magnetita foi encontrada em Magnésia na Turquia a 2500 anos atrás, a palavra do dicionário inglês *magnet* surgiu a partir da palavra grega *magnes* derivada do nome Magnésia (CARTER; NORTON, 2013). Atualmente as cerâmicas magnéticas são aplicadas em componentes eletrônicos, e sua utilização comercial em escala industrial começou em 1952, produzidas pelas indústrias PHILIPS que desenvolveu o primeiro áudio-cassete (precursor do videocassete) em 1963 (CARTER; NORTON, 2013; KRAUS, 1994).

O comportamento magnético, também conhecido como magnetização global de um material, é resultante do somatório dos momentos atômicos locais dos dipolos magnéticos no interior de sua estrutura. Os dipolos magnéticos estão presentes em cada elétron devido a rotação em seu próprio eixo e a sua rotação em torno do núcleo do átomo, esquematizados na Figura 2.1 (a) e (b) respectivamente (KINGERY, 1976). Estas rotações geram os spins magnéticos e o conjunto dos momentos magnéticos dos elétrons de um átomo, alinhados aos momentos dos átomos vizinhos, geram regiões chamadas de domínios magnéticos esquematizados na Figura 2.2. A interface entre dois domínios apresenta uma variação na direção dos momentos magnéticos e é denominada parede do domínio. A capacidade de orientação das paredes e consequente magnetização do material é definida como susceptibilidade magnética (χ_m). O somatório das direções e intensidades dos momentos magnéticos dos domínios dão origem ao comportamento magnético resultante do material (CARTER; NORTON, 2013; KINGERY, 1976; LAWRENCE H. VAN VLACK, 1970).

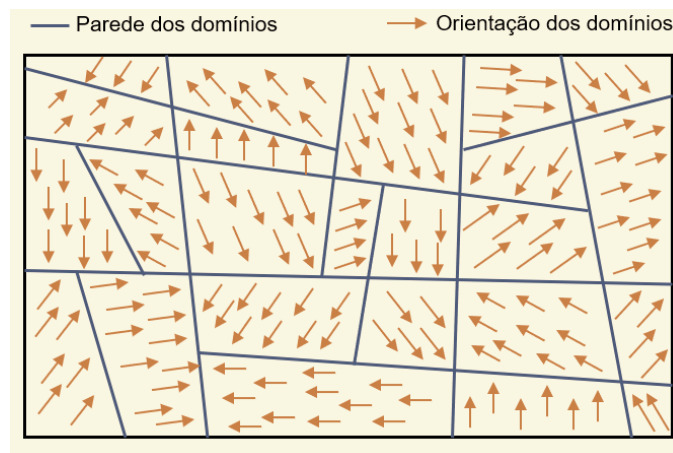
Figura 2.1 - Geração dos momentos magnéticos atômicos.



(a) Orbital do elétron em volta do núcleo e (b) Rotação dos elétrons em volta de seu próprio eixo.

Fonte: Produção do autor.

Figura 2.2 - Representação de domínios magnéticos e a parede dos domínios.



Fonte: Produção do autor.

Em materiais magnéticos como as ferritas, o comportamento magnético é devido a presença de metais de transição (Fe^{2+} e Fe^{3+}), estes possuem elétrons na camada 3d e o momento magnético de seus spins pode ser calculado conforme a Equação 2.1 (CARTER; NORTON, 2013).

$$\mu_{ion} = 2\mu_B \sqrt{[S(S + 1)]} \quad (2.1)$$

Onde:

μ_{ion} = momento magnético do íon;

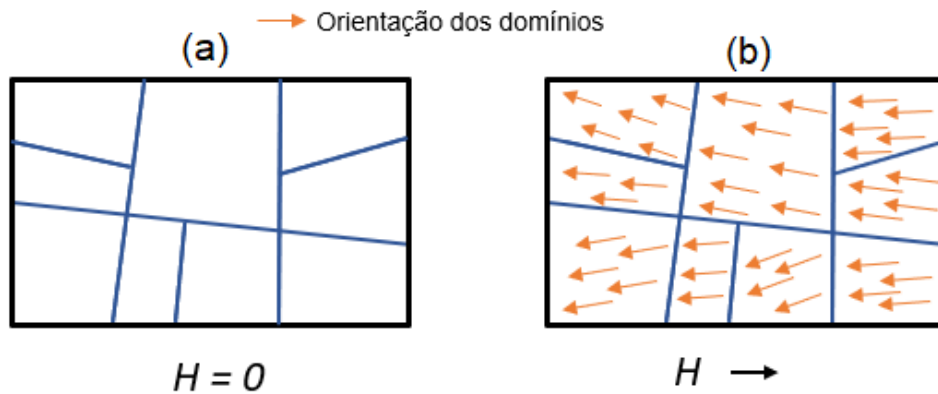
$\mu_B = 9,27 \times 10^{-24}$ Am² (momento magnético fundamental de Bohr);

$S = \sum m_s$ (somatório das direções dos spins, +1/2 spin para cima e -1/2 spin para baixo).

O momento magnético resultante é denominado magnetização espontânea \vec{B} , no qual o balanço de energia entre os momentos magnéticos é dependente de quais cátions metálicos estão presentes na rede cristalina da ferrita. Determinados cátions com variados tamanhos e mobilidades dentro da rede cristalina possuem posições preferenciais dentro da rede. Isto resulta a respostas diferentes à um determinado campo magnético externo (VALENZUELA, 1994). A resposta magnética de um material em relação a um campo externo pode ser classificada de algumas formas diferentes conforme descritas a seguir (CARTER; NORTON, 2013; CALLISTER, 1991).

Materiais Diamagnéticos: Possuem todos elétrons emparelhados gerando cancelamento nos momentos dos elétrons, e o momento resultante torna-se nulo como demonstrado na Figura 2.3 (a). Na presença de um campo magnético externo, gera um campo magnético interno com direção inversa ao campo aplicado, como demonstrado na Figura 2.3 (b). Desta forma sua susceptibilidade magnética (χ_m) é pequena e negativa ($10^{-5} < |-\chi_m| < 10^{-6}$) (CALLISTER, 1991).

Figura 2.3 - Material Diamagnético

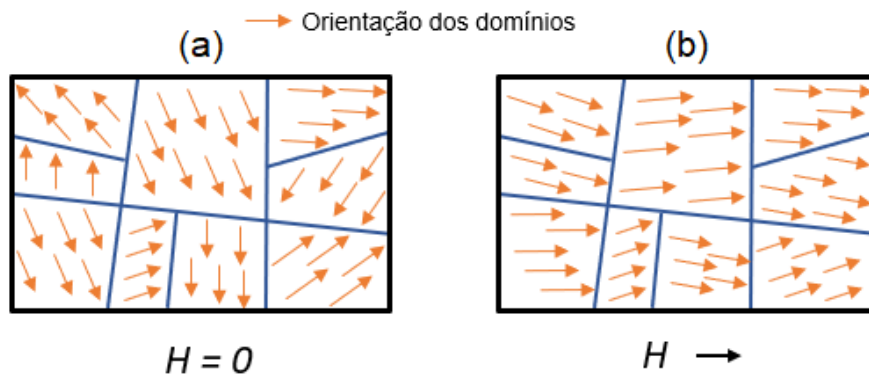


(a) Sem aplicação de campo magnético e (b) Com aplicação de campo magnético, polarização interna em direção oposta ao campo aplicado.

Fonte: Produção do autor.

Materiais Paramagnéticos: Possuem elétrons desemparelhados gerando uma polarização permanente como demonstrado na Figura 2.4 (a). Esta configuração interna resulta em uma magnetização nula pois os momentos magnéticos estão em direções aleatórias causando seus cancelamentos em escala macroscópica. Na presença de um campo magnético externo estes materiais sofrem a orientação dos momentos magnéticos internos na mesma direção do campo aplicado como demonstrado na Figura 2.4 (b). Sua susceptibilidade magnética (χ_m) é pequena e positiva ($10^{-3} < |\chi_m| < 10^{-5}$) (CALLISTER, 1991).

Figura 2.4 - Material Paramagnético

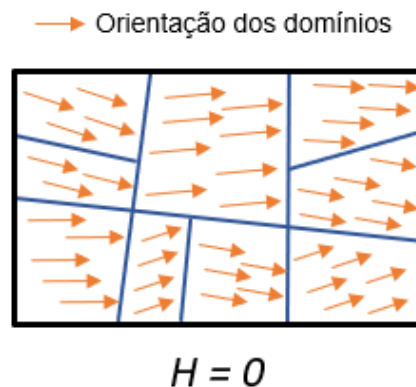


(a) Sem aplicação de campo magnético e (b) Com aplicação de campo magnético, polarização interna em direção ao campo aplicado.

Fonte: Produção do autor.

Materiais Ferromagnéticos: Possuem polarização permanente devido aos dipolos magnéticos em seu interior causados pela combinação dos elétrons alinhado como demonstrado na Figura 2.5. Na presença de campo magnético externo sofrem alta magnetização em direção ao campo aplicado. Sua Susceptibilidade magnética (χ_m) é alta e positiva ($10^{-2} < |\chi_m| < 10^6$) (CALLISTER, 1991).

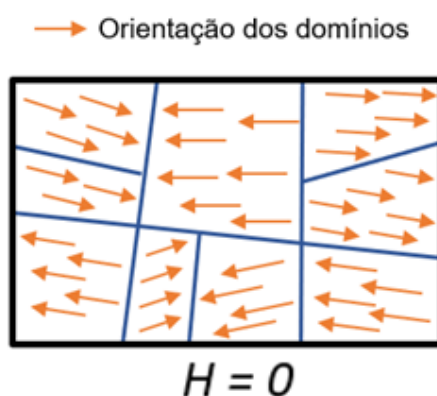
Figura 2.5 - Material Ferromagnético com polarização permanente sem aplicação de campo magnético externo.



Fonte: Produção do autor.

Materiais Antiferromagnéticos: Possuem dipolos magnéticos, porém não apresentam magnetização resultante devido aos elétrons estarem em posições antiparalelas. Esta configuração gera um cancelamento mútuo dos momentos magnéticos como demonstrado na Figura 2.6. Contudo, na presença de um campo magnético externo, estes sofrem polarização em direção ao campo aplicado. Susceptibilidade magnética (χ_m) é relativamente baixa e positiva ($0 < |\chi_m| < 10^{-2}$) (CALLISTER, 1991).

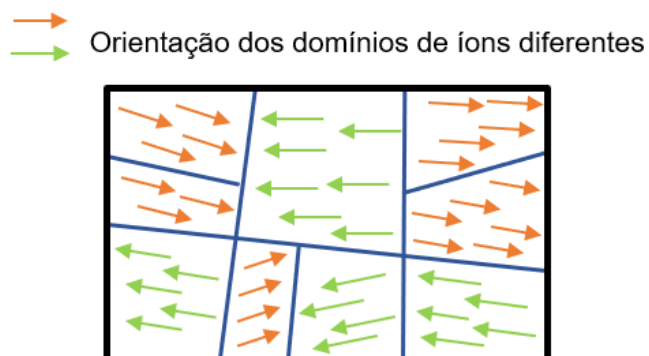
Figura 2.6 - Material Antiferromagnético com alinhamento antiparalelo dos spins.



Fonte: Produção do autor..

Materiais Ferrimagnéticos: Possuem estrutura antiparalelas como os antiferromagnéticos, porém apresentam mais de um tipo de íon com diferentes magnitudes de momentos magnéticos como demonstrado na Figura 2.7. Com isso, os íons em posições antiparalelas não se cancelam, resultando em um momento magnético permanente. Sua susceptibilidade magnética (χ_m) é positiva e alta ($10^{-2} < |\chi_m| < 10^6$) (CALLISTER, 1991).

Figura 2.7 - Materiais ferrimagnéticos com íons diferentes em posição antiparalela.

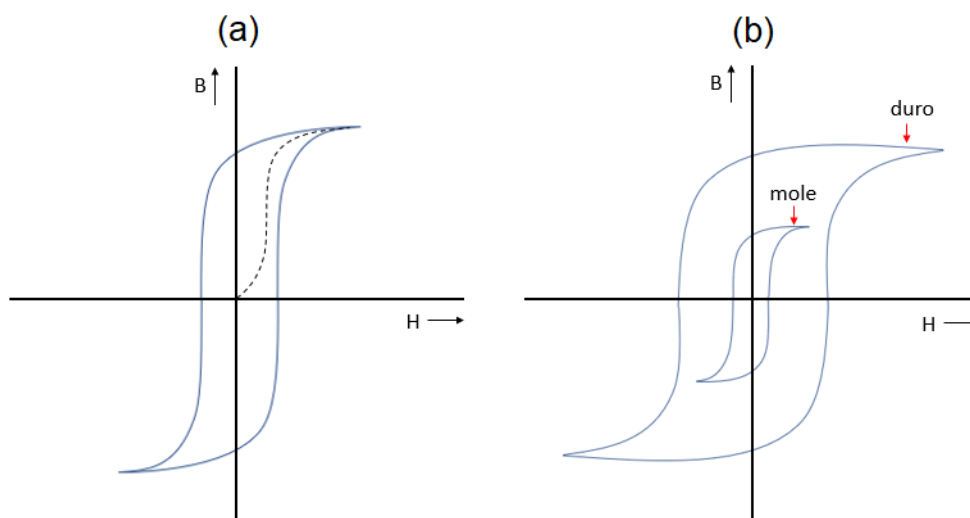


Fonte: Produção do autor.

Os materiais magnéticos moles apresentam relativa facilidade de magnetização interna \vec{B} , ou seja, fácil orientação dos momentos magnéticos dos domínios em relação a direção do campo magnético externo \vec{H} . Os materiais magnéticos que não apresentam tal facilidade de magnetização são classificadas como magnéticos duros (VALENZUELA, 1994).

Os materiais magnéticos moles são encontrados em dispositivos eletrônicos que necessitam de uma rápida polarização e um mínimo de perda de energia como dispositivos para transmissão de dados em corrente alternada. Os materiais magnéticos duros são encontrados em dispositivos eletrônicos para armazenamento de dados, pois uma vez magnetizados com determinada informação, estes matem a polarização com maior qualidade sem perda de dados (CARTER; NORTON, 2013). A polarização magnética é resultante da interação dos domínios com o campo externo aplicado. A Figura 2.8 demonstra uma representação esquemática de (a) como os domínios se comportam devido a um campo magnético externo \vec{H} em duas diferentes direções e (b) a diferença entre um material magnético mole duro (CARTER; NORTON, 2013).

Figura 2.8 - Representação esquemática da magnetização de um material.



(a) Variação do campo magnético interno \vec{B} em função de um campo magnético externo \vec{H} e (b) Comparação entre material magnético duro e mole.

Fonte: Produção do autor.

2.2 Estrutura das ferritas

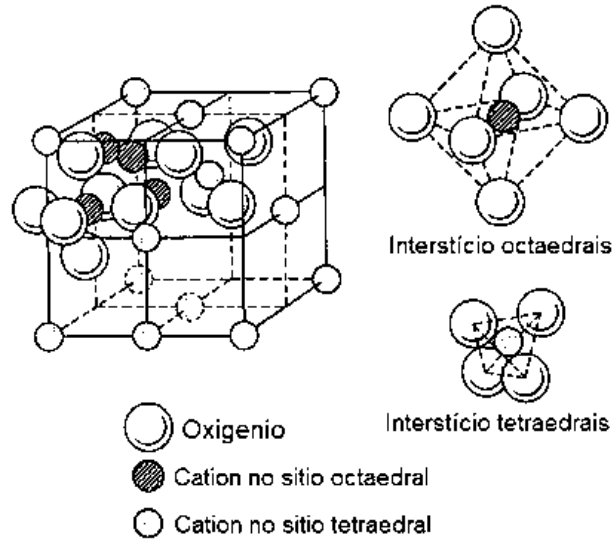
As primeiras ferritas despertaram o interesse em aplicações magnéticas em meados da década de 40 com a síntese de estruturas cúbicas com a presença de ferro, conhecidas posteriormente por ferritas. A utilização das ferritas começou com as ferritas de CuZn, ferritas de MgZn, ferritas de NiZn, e as ferritas de MnZn (GOMES, 2014; RODRIGUES, 2010).

Os materiais denominados ferritas possuem estruturas com base no óxido de ferro e a grande quantidade de ferritas diferentes é devido a possibilidade de o óxido de ferro reagir com outros óxidos metálicos (RODRIGUES, 2010). A estrutura base da ferrita pode ser representada pela forma: $(Me_2^{k+}O_k^{2+})(Fe_2^{3+}O_3^{2-})$, no qual Me representa um cátion metálico (KIKUKAWA et al., 2004). Cada estrutura de ferrita possibilita propriedades elétricas e magnéticas diferentes. É possível diferenciar as estruturas das ferritas em 4 tipos como descritos a seguir (RODRIGUES, 2010; KIKUKAWA et al., 2004; BEZERRA, 2007).

Estrutura espinélio: sistema cúbico demonstrado na Figura 2.9, segue a formula geral AB_2O_4 sendo A e B cátions metálicos, no qual os cátions metálicos A estão

em posições tetraedrais e os cátions metálicos B estão em posições octaedrais (GOMES, 2014) (KINGERY, 1976).

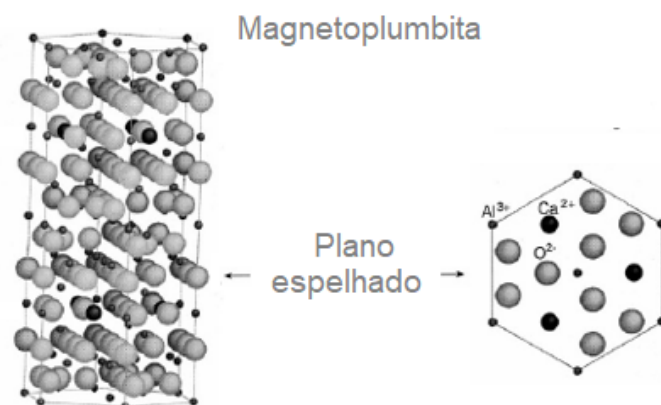
Figura 2.9 - Estrutura Espinélio com fórmula geral AB_2O_4 .



Fonte: Kingery (1976).

Estrutura Magnetoplumbita: demonstrado na Figura 2.10 como um sistema hexagonal, apresenta um empilhamento de bloco da estrutura espinélio porém com planos separados por espelhos, e segue a fórmula geral $AB_{12}O_{19}$, sendo A e B cátions metálicos (CINIBULK, 2000).

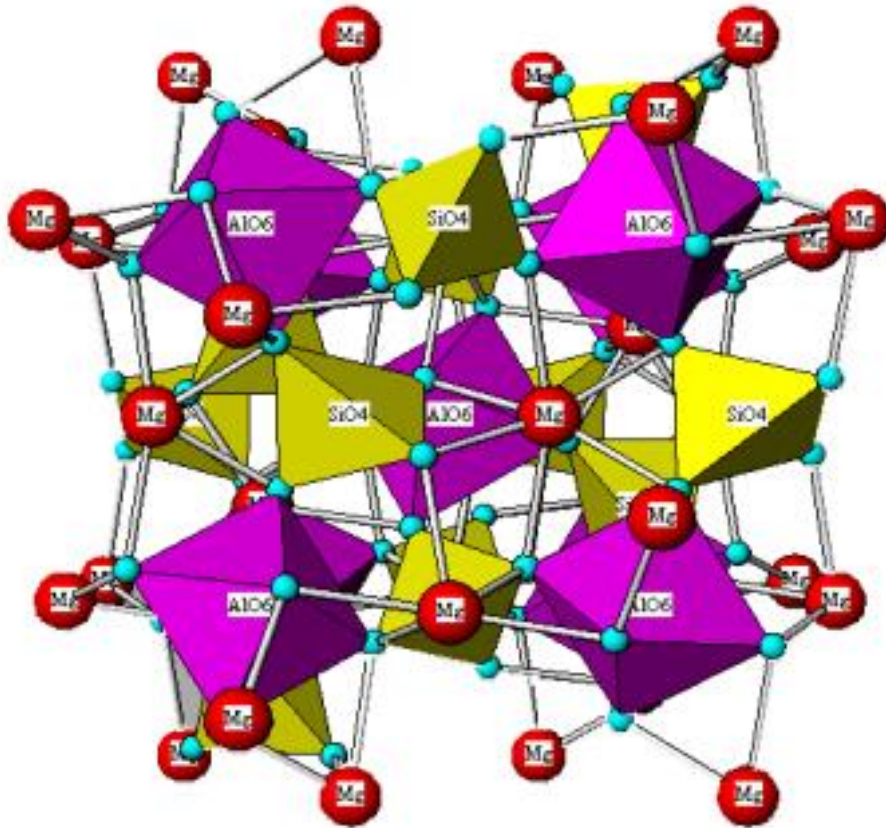
Figura 2.10 - Estrutura Magnetoplumbita, fórmula geral $AB_{12}O_{19}$.



Fonte: Adaptado de Cinibulk (2000).

Estrutura Granada: ou também conhecido como Garnet, demonstrado na Figura 2.11, possui sistema cúbico com fórmula $A_3B_2(SiO_4)_3$, sendo A e B cátions metálicos (ZANATTA, 2006).

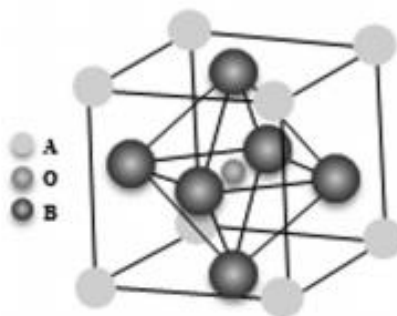
Figura 2.11 - Estrutura Granada natural $Mg_3Al_2(SiO_4)_3$.



Fonte: Zanatta (2006).

Estrutura Perovskita: demonstrado na Figura 2.12, possui estrutura cúbica e fórmula geral ABO_3 , sendo A e B cátions metálicos (GARCIA et al., 2014).

Figura 2.12 - Estrutura Perovskita com fórmula geral ABO_3 .



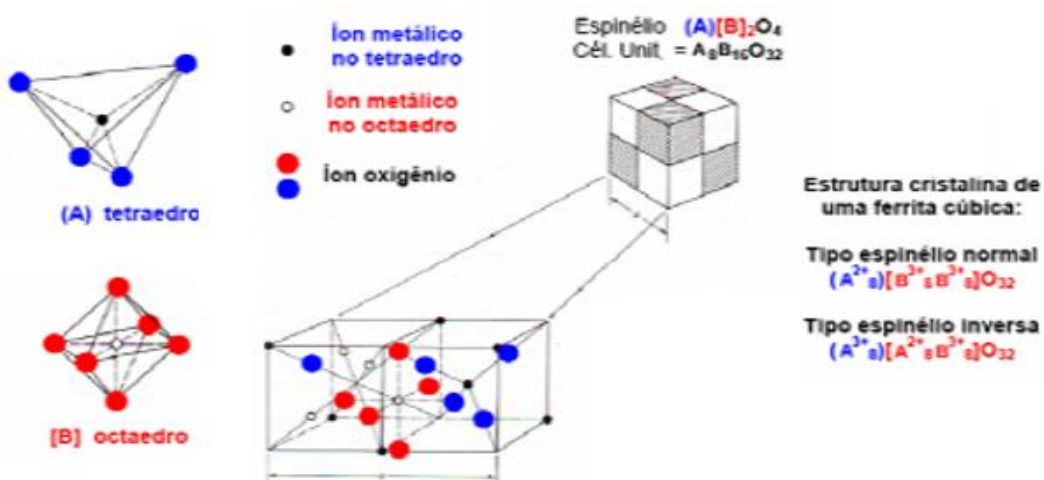
Fonte: Adaptado de Garcia et al. (2014).

2.3 Ferritas de manganês e zinco

Atualmente é possível encontrar as ferritas em várias aplicações eletrônicas devido as suas propriedades magnéticas tais como: alta permeabilidade inicial, alta magnetização de saturação e alta resistividade (BEZERRA, 2007; GAMA, 2009). As ferritas de MnZn pertencem ao grupo de ferritas com estrutura espinélio com fator de empacotamento entre $8,44$ e $8,53 \times 10^{-4} \mu\text{m}$ (GAMA, 2009).

As ferritas de MnZn podem apresentar duas estruturas devido ao alto caráter eletronegativo do oxigênio gerando uma variação entre os cátions nas posições tetraedrais e octaedrais. Com isso, a ferrita de MnZn pode apresentar duas formulas estruturais. A primeira definida com fórmula $(A)[B_2]O_4$ ou $(A^{2+})[B^{3+}B^{3+}]O_4$ e referente a estrutura denominada espinélio normal. A segunda com fórmula $(A)[AB]O_4$ ou $(A^{3+})[B^{2+}A^{3+}]O_4$ e referente a estrutura denominada espinélio invertida (BEZERRA, 2007; GAMA, 2009). O sistema cubico espinélio está demonstrado na Figura 2.13, no qual é possível observar que ao alterar a posição dos cátions entre os sítios octaedrais e tetraedrais o momento magnético resultante deve alterar.




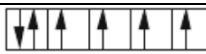
Figura 2.13 - Representação de uma célula unitária cúbica de face centrada, do tipo espinélio



Fonte: Adaptado de Bezerra (2007).

A estrutura espinélio quando preenchida por todos os cátions metálicos não apresenta momento magnético global em temperatura ambiente e recebe o nome de espinélio normal. Porém a estrutura denominada espinélio invertida apresenta momento global magnético diferente de zero devido aos íons Fe^{3+} que estão localizados nas posições tetraedrais e octaédrais e os cátions de valência $2+$ nas posições octaédrais restantes (BEZERRA, 2007; GAMA, 2009). O momento magnético dos cátions Fe^{3+} pode ser visto na Tabela 2.1, no qual é possível observar o momento magnético de alguns cátions calculados através da Equação 2.1 (CARTER; NORTON, 2013).

Tabela 2.1 - Momento magnético dos cátions de metais de transição isolados.

Cátion	Configuração do elétron Camada 3d	Momento Magnético calculado (μB)
Mn^{3+}		$\approx 4,90$
$\text{Mn}^{2+}, \text{Fe}^{3+}$		$\approx 5,92$
Zn^{2+}		≈ 0
Fe^{2+}		$\approx 5,4$

Fonte: Adaptado de Carter e Norton (2013).

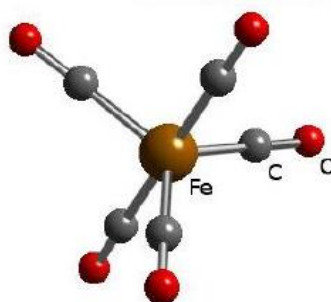
As camadas preenchidas totalmente possuem momento magnético nulo, pois estas estão preenchidas com elétrons em paralelo gerando cancelamento entre os mesmos. Desta forma, para cálculo do momento magnético utiliza-se os elétrons do orbital não preenchidos totalmente, que no caso da ferrita de MnZn é o orbital 3d (CARTER; NORTON, 2013).

2.4 Estrutura da ferrocobalita

Além das ferritas, a ferrocobalita também vem ganhando destaque em aplicações eletrônicas MARE em núcleos de bobinas de alta frequência. A

ferrocarbonila é obtida pela decomposição da ferro-pentacarbonila com estrutura demonstrada na Figura 2.14. A ferro-pentacarbonila é um composto a base de um átomo de ferro ligado a cinco grupos carbonilas. O ferro, que constitui cerca de 96% da massa deste material, é responsável pela origem dos momentos magnéticos da ferrocarbonila (RODRIGUES, 2010; GOMES, 2014).

Figura 2.14 - Representação da estrutura da Ferro-pentacarbonila



Fonte: Rodrigues (2010).

Atualmente, a empresa alemã BASF é uma das que comercializam a ferrocarbonila, como exemplo, em forma de particulados entre 1 - 8 μm , sem poros e de alta pureza. A ferrocarbonila é obtida a partir do pó de ferro pelo processo de síntese e purificação da ferro-pentacarbonila. A ferrocarbonila pode ter caráter magnético mole ou duro dependendo de seu processo de síntese. A ferrocarbonila macia, utilizada neste trabalho, é obtida através de atmosfera de hidrogênio com presença de N, C, e O. Estes átomos reduzem a resistência mecânica e conseqüentemente aumentam a permeabilidade e a capacidade de magnetização do material (RODRIGUES, 2010). O processo de síntese da ferrocarbonila utilizada pode ser visto a seguir na Figura 2.15.

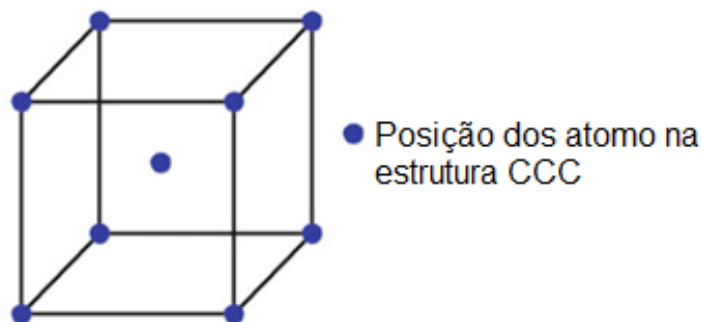
Figura 2.15 - Processo de purificação da Ferro-pentacarbonila



Fonte: Adaptado de Rodrigues (2010).

A ferrocarbonila é composta basicamente pelo ferro na estrutura Ferro- α e algumas regiões dielétricas de Fe_xN e Fe_xC . Desta forma, a estrutura cristalina da ferrocarbonila é majoritariamente composta pela estrutura cúbica de corpo centrado demonstrado na Figura 2.16.

Figura 2.16 - Estrutura cúbica de corpo centrado referente a estrutura da ferrocarbonila.



Fonte: Carter e Norton (2013).

2.5 Borracha de silicone

A Borracha de silicone foi descoberta no início do século XX, e é um material derivado da junção de cloreto de metila e areia de silício, dando origem a uma

cadeia polimérica heterogênea com átomos de silício (Si) e oxigênio (O) intercalados. Esta estrutura possui grupos laterais metil ligados ao Silício que proporcionam a estabilidade da cadeia e com isso o silicone demonstra grande resistência química. Este tipo de material é considerado um semi-orgânico e não é derivado essencialmente do petróleo (GRUSHEVENKO et al., 2019; KASHI et al., 2018).

Em relação à seu comportamento termomecânico, este é definido como um elastômero com resistência a tração entre 10 a 100 psi, e que dependo de seu dopante pode apresentar estabilidade térmica estrutural entre -40°C e 200°C. Este material possui alto módulo de elasticidade podendo alcançar 300% a 400% de alongamento (KASHI et al., 2018; CANEVAROLO JÚNIOR, 2006).

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

2.6 Teoria da propagação de onda eletromagnética em meios materiais

A análise de materiais eletromagnéticos leva ao estudo da teoria do eletromagnetismo e ao comportamento de um campo eletromagnético através de um meio material. Neste estudo, é importante uma análise dos fenômenos que podem ocorrer durante a interação de uma determinada onda eletromagnética com diferentes meios materiais. Para compreensão dos fenômenos entre uma onda eletromagnética e a matéria é preciso ter em mente as equações de Maxwell afim de descrever o comportamento de um espectro eletromagnético (ULABY, 2007; POZAR, 2011).

O eletromagnetismo atual é baseado nas Equações 2.2, 2.3, 2.4 e 2.5, denominadas equações fundamentais do eletromagnetismo, descritas pelo físico e matemático escocês James Clerk Maxwell a partir de estudos desenvolvidos por Gauss, Ampère e Faraday (POZAR, 2011; OTT, 2001).

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_v \quad (2.2)$$

$$\nabla \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} - \vec{M} \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.4)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J} \quad (2.5)$$

Onde, \vec{H} é campo magnético externo, \vec{E} é o campo elétrico externo, \vec{B} é a densidade de fluxo magnético no interior do material, \vec{D} é a densidade de fluxo elétrico no interior do material, ρ_v é denominada densidade de fluxo elétrico ao longo do volume analisado, t é o tempo decorrido, \vec{M} é a corrente magnética e \vec{J} é a corrente elétrica induzida pela variação do campo magnético.

2.6.1 Propriedades de um determinado meio material

As densidades de fluxo elétrico e magnético são relacionadas respectivamente com os campos elétricos e magnéticos externos conforme parâmetros de proporcionalidade denominados permissividade elétrica (ϵ) e permeabilidade magnética (μ) e definidos como propriedades de um meio material. A relação entre a excitação externa (\vec{E}, \vec{H}) e a resposta interna do material (\vec{D}, \vec{B}) devido a suas propriedades é dado conforme as Equações 2.6 e 2.7 (IDA, 2015; OTT, 2001; CARTER; NORTON, 2013).

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (2.6)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2.7)$$

Estes parâmetros são utilizados para a caracterização do comportamento elétrico e magnético de diferentes meios materiais, definidos desta forma como propriedades intrínsecas dos materiais.

O valor da permissividade elétrica e a permeabilidade magnética do vácuo são utilizadas como parâmetros de comparação e de forma relativa, permissividade relativa (ε_r) e a permeabilidades relativas (μ_r) dos materiais. Ao caracterizar um material, a permissividade relativa e a permeabilidade relativa são tratadas como valores recorrentes ao realizar medições em equipamentos como analisadores de rede vetorial. Contudo, para se considerar o real valor deve-se tomar o produto do valor relativo com o valor de parâmetro referente ao vácuo, tal relação é demonstrada pelas Equações 2.8 e 2.9 (IDA, 2015).

$$\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0 \quad (2.8)$$

$$\mu = \mu_r \mu_0 \quad (2.9)$$

Onde, ε_r é denominado permissividade elétrica relativa e ε_0 é a permissividade elétrica do vácuo ($\varepsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12}$ F/m) . E μ_r é denominado permeabilidade magnética relativa e μ_0 é a permeabilidade magnética do vácuo ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Henry ou H/m) .

A permissividade elétrica e a permeabilidade magnética são propriedades de um determinado meio material e representam o quanto o meio é influenciado por um campo elétrico, magnético ou eletromagnético. Desta forma ambas propriedades devem descrever fenômenos capacitivos e dissipativos que podem ocorrer no interior de um material e são descritos por componentes reais e imaginários conforme as Equações 2.10 e 2.11 (BALANIS, 1938; ULABY, 2007; SADIKU, 2007) . A componente real da propriedade é referente a fenômenos capacitivos devido a armazenar a energia da excitação externa. E a componente imaginária

é referente a fenômenos dissipativos devido a propagação da energia proveniente da perturbação gerada pela excitação externa.

$$\varepsilon = \varepsilon' - j \varepsilon'' \quad (2.10)$$

$$\mu = \mu' - j \mu'' \quad (2.11)$$

A permissividade elétrica e a permeabilidade magnética são resultantes do comportamento macroscópico de um determinado meio material, desta forma são resultantes da susceptibilidade intrínseca do mesmo. A relação entre susceptibilidade elétrica e permissividade elétrica é dada conforme a relação descrita na Equação 2.12. E a relação entre susceptibilidade magnética χ_m e permeabilidade magnética é descrita conforme a Equação 2.13. Ambas equações demonstram que quanto maior a polarização ou magnetização do meio, maior sua respectiva propriedade relativa (VORST; ROSEN; KOTSUKA, 2006).

$$\varepsilon_r = \chi_e + 1 \quad (2.12)$$

$$\mu_r = \chi_m + 1 \quad (2.13)$$

2.6.2 Comportamento eletromagnético

A onda eletromagnética pode ser considerada como um campo magnético e um campo elétrico perpendiculares entre si e que se propagam através de um meio material. A descrição matemática do comportamento de propagação desses campos pode ser feita em forma de fasores. A base para quantificar a fase da onda eletromagnética são as equações de Maxweel descritas pelas relações das Equações 2.14, 2.15 e 2.16 (POZAR, 2011).

$$\nabla \times \vec{E} = -j\omega\mu\vec{H} \quad (2.14)$$

$$\nabla \times \vec{H} = j\omega\varepsilon\vec{E} \quad (2.15)$$

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E} = -j\omega\mu\nabla \times \vec{H} = \omega^2\mu\varepsilon\vec{E} \quad (2.16)$$

E que resultam nas seguintes equações conhecidas como equações de Helmholtz:

$$\nabla^2 \vec{E} + \omega^2\mu\varepsilon\vec{E} = 0 \quad (2.17)$$

$$\nabla^2 \vec{H} + \omega^2\mu\varepsilon\vec{H} = 0 \quad (2.18)$$

Das Equações 2.17 e 2.18, é possível definir uma constante k dado por $k = \omega\sqrt{\varepsilon\mu}$ e denominada como constante de fase da onda ou número de onda em um determinado meio, e sua unidade é 1/m, e onde ω é a velocidade angular da onda.

Em um determinado meio material, a permissividade e a permeabilidade do meio são resultadas da forma como a onda irá se propagar. A partir deste parâmetro é possível classificar um meio material de três formas diferentes: meio sem perdas, meio de perdas gerais e meio condutor (POZAR, 2011).

O meio sem perdas é caracterizado por apresentar permissividade e permeabilidade apenas por números reais, ou seja, é um meio que não apresenta fatores dissipativos para uma determinada onda eletromagnética. Neste meio considera-se o campo elétrico somente na direção \hat{x} e uniforme nas direções \hat{x} e \hat{y} . Neste tipo de meio, o campo elétrico e o campo magnético podem ser descritos conforme as Equações 2.19 e 2.20 (OTT, 2001).

$$E_x(z) = E^+e^{-jkz} + E^-e^{jkz} \quad (2.19)$$

$$H_y = \frac{j}{\omega\mu} \frac{\partial E_x}{\partial z} = \frac{1}{\eta} (E^+ e^{-jkz} - E^- e^{jkz}) \quad (2.20)$$

Onde E^+ e E^- são constantes arbitrárias de amplitude e η é denominado impedância intrínseca ($\eta = \omega\mu / k = \sqrt{\mu/\epsilon}$) e é utilizado para quantificar a dificuldade de propagação de uma onda eletromagnética por um determinado meio material. As Equações 2.19 e 2.20 demonstram que o campo elétrico e o campo magnético são ortogonais entre si e ortogonais a direção de propagação ($\pm \hat{z}$), este modo de onda é chamado de onda transversal eletromagnético (TEM).

Como visto na Equação 2.19, o campo se propaga na direção \hat{z} e não ocorre variação, então $\omega t - kz$ é constante, desta forma a velocidade da onda v_p , ou também conhecido como velocidade de fase, pode ser descrita pela Equação 2.21 (IDA, 2015).

$$v_p = \frac{dz}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{\omega t - \text{constante}}{k} \right) = \frac{\omega}{k} = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \quad (2.21)$$

No vácuo, $v_p = 2,998 \times 10^8$ m/s referente a velocidade da luz. A velocidade da onda eletromagnética é dependente da interação da mesma com um determinado meio material como pode ser observado no último fator da Equação 2.21. Em um meio com perdas gerais considera-se um efeito médio de perda devido a um determinada da condutividade (σ) do meio. As equações de Maxwell para campo elétrico e campo magnético da onda neste tipo de meio podem ser descritas conforme as Equações 2.22 e 2.23 (POZAR, 2011).

$$\nabla \times \vec{E} = -j\omega\mu\vec{H} \quad (2.22)$$

$$\nabla \times \vec{H} = j\omega\epsilon\vec{E} + \sigma\vec{E} \quad (2.23)$$

Resultando em uma equação para campo elétrico:

$$\nabla^2 X \vec{E} + \omega^2 \mu \epsilon \left(1 - j \frac{\sigma}{\omega \epsilon}\right) \vec{E} = 0 \quad (2.24)$$

$$\nabla X \vec{H} = j \omega \epsilon \vec{E} + \sigma \vec{E} \quad (2.25)$$

E o campo magnético associado pode ser descrito conforme a Equação 2.26.

$$H_y = \frac{j}{\omega \mu} \frac{\partial E_x}{\partial z} = \frac{1}{\eta} (E^+ e^{-jkz} - E^- e^{jkz}) \quad (2.26)$$

E com isto é possível definir um parâmetro denominado por constante de propagação complexa (γ), e descrito conforme a Equação 2.27 (ULABY, 2007; IDA, 2015).

$$\gamma = \alpha + j\beta = j\omega \sqrt{\mu \epsilon} \sqrt{1 - j \frac{\sigma}{\omega \epsilon}} \quad (2.27)$$

O fator α é denominado como constante de atenuação e o fator β é denominada constante de fase da onda. A constante de propagação complexa (γ) demonstra que um meio com perda deve ser descrito como um fator complexo. O meio com perdas ao interagir com uma determinada onda eletromagnética realiza o fenômeno de dissipação de energia e gera defasagem na orientação dos dipolos elétricos ou magnéticos em relação a frequência da onda. A relação entre polarização e magnetização é dada pela impedância do meio (η) discutido inicialmente na Equação 2.20 para descrever o campo magnético associado ao campo elétrico aplicado. A impedância pode ser definida como uma relação das propriedades de permissividade elétrica, permeabilidade magnética e condutividade elétrica conforme descrito na Equação 2.28 (OTT, 2001).

$$\eta = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\epsilon}} \quad (2.28)$$

Um meio condutor é um caso especial de análise, nessa classificação de meio se encontra a maioria dos metais devido a sua alta condutividade elétrica ($\sigma \gg \omega\epsilon$). A permissividade complexa apresenta parcela dissipativa com maior

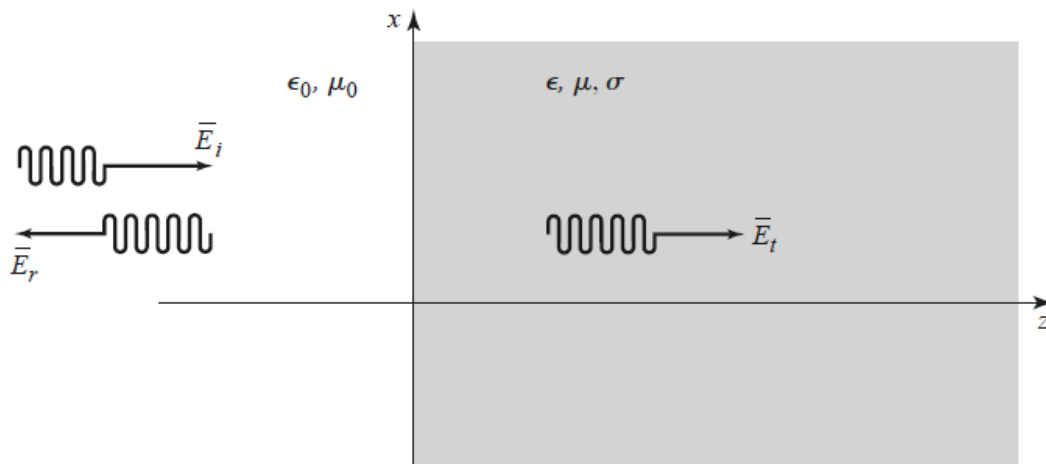
influência do que a parcela capacitiva devido à facilidade de propagação ($\epsilon'' \gg \epsilon'$). A propagação da onda em meios condutores é relativamente mais difícil devido à grande perda de energia para o meio devido a dissipação. Nos materiais com relativa condutividade é caracterizado a distância no qual uma determinada onda eletromagnética consegue ser transmitida no interior do material. Esta distância é definida como distância de penetração da onda ou mais conhecido pelo termo em inglês *skin depth* (δ), e é dado pelo inverso da constante de atenuação, conforme a Equação 2.29 (ORFANIDIS, 2008; PAUL, 2009).

$$\delta = \frac{1}{\alpha} = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \quad (2.29)$$

A onda eletromagnética ao se propagar por um meio pode ser descrita pelas três maneiras como dito anteriormente neste Capítulo. Porém é importante relevar que a propagação da onda na interface de dois meios diferentes pode apresentar fenômenos que podem alterar o comportamento característico da onda.

Dois meios diferentes apresentam permissividade e permeabilidade diferentes. Na interface entre estes dois meios, a onda pode sofrer o fenômeno chamado de reflexão, este fenômeno se caracteriza como o retorno da onda eletromagnética ao meio incidente ao encontrar a interface entre os dois meios. A passagem da onda eletromagnética através da interface é denominada fenômeno de transmissão da onda (ULABY, 2007; POZAR, 2011). A Figura 2.17 a seguir demonstra a interface entre dois meios e o fenômeno de reflexão e transmissão de uma radiação eletromagnética.

Figura 2.17 - Esquematização da reflexão e transmissão de uma onda incidente \vec{E}_i na interface de dois meios diferentes.



Fonte: Pozar (2011).

A parcela de energia da onda refletida é denominada como coeficiente de reflexão Γ e a parcela de energia transmitida é denominada coeficiente de transmissão T , e ambos dependem das propriedades dos dois meios conforme as Equações 2.30, 2.31 e 2.32 (ORFANIDIS, 2008)(PAUL, 2009)(OTT, 2001).

$$\Gamma + T = 1 \quad (2.30)$$

$$\Gamma = \frac{\eta - \eta_0}{\eta + \eta_0} \quad (2.31)$$

$$T = 1 + \Gamma = \frac{2\eta}{\eta + \eta_0} \quad (2.32)$$

Onde η_0 é a impedância do vácuo.

2.7 Guia de onda

Neste trabalho, o material utilizado para análise é composto por uma porcentagem em massa de um material com características magnéticas e um material com características dielétricas. A junção desses dois tipos de materiais resulta em um meio combinado que apresenta um comportamento diferente dos materiais separados. A Analise e organização o princípio das equações de

propagação da onda eletromagnética, para cada tipo de meio, se torna necessário para caracterizar o comportamento resultante da onda eletromagnética. As características do material, como impedância em função da permissividade elétrica e permeabilidade magnética, entre outras propriedades, influenciam na forma e a facilidade de propagação da onda. Estes parâmetros são importantes para o estudo e análise dos fenômenos entre a radiação e a matéria. Contudo, não apenas a forma de propagação, mas também o caminho percorrido pela onda eletromagnética deve ser estudado e considerado. Devido a isso, é importante o estudo das equações características do modo de propagação no interior guia de onda retangular.

Um Guia de Onda pode ser descrito como um sistema fechado para propagação de uma determinada onda eletromagnética, no qual a onda se encontra delimitada no interior deste guia devido ao fenômeno de reflexão nas paredes deste sistema. O fenômeno de reflexão e conseqüentemente confinamento da onda dentro do guia é devido ao tipo de material condutor das paredes. Neste tipo de sistema é possível colocar amostras com diferentes propriedades e impedâncias. O modo de propagação de ondas planas no interior de um guia de onda é descrito como modo transversal, no qual o campo elétrico e o campo magnético se propagam de maneira perpendicular. Com isso, a onda pode ser classificada como modo transversal elétrico (TE), modo transversal magnético (TM), e modo transversal eletromagnético (TEM) (IDA, 2015).

O modo TEM é caracterizado por não haver um campo elétrico ou magnético na direção z de propagação da onda eletromagnética, ou seja, E_z e $H_z = 0$. Na qual, a constante de propagação deste modo (γ_{TEM}) e a impedância intrínseca deste modo (η_{TEM}) podem ser definidos como descritos nas Equações 2.33 e 2.34 (POZAR, 2011; IDA, 2015).

$$\gamma_{TEM} = j\omega\sqrt{\mu\epsilon}\sqrt{1 - j\frac{\sigma}{\omega\epsilon}} \quad (2.33)$$

$$\eta_{TEM} = \frac{E_x}{H_y} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (2.34)$$

O modo TE é caracterizado por apresentar um campo magnético na mesma direção z de propagação da onda, ou seja, $E_z = 0$ e $H_z \neq 0$. Com isso a constante de atenuação deste modo (γ_{TE}) e a impedância do meio deste modo (η_{TE}) podem ser descrito como nas Equações 2.35 e 2.36 (IDA, 2015).

$$\gamma_{TE} = \sqrt{k_c^2 - \omega^2 \mu \epsilon} \quad (2.35)$$

$$\eta_{TE} = \frac{E_x}{H_y} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \frac{1}{\sqrt{1 - f_c^2/f^2}} \quad (2.36)$$

Onde k_c é a número de onda de corte, e representa a condição no qual a propagação da onda é zero, ou seja, não ocorre a propagação. E f_c é dito frequência de corte e é descrita como na Equação 2.37 (IDA, 2015).

$$f_c = \frac{k_c}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} \quad (2.37)$$

Para frequências abaixo da frequência de corte, $f < f_c$, ocorre atenuação na onda e conseqüentemente não ocorre sua propagação pois a constante de fase se torna zero, $\gamma = \alpha$. Para frequências acima da frequência de corte $f > f_c$, a onda não sofre atenuação devido a constante de propagação resultar somente pela componente imaginária.

Desta forma, a constante de fase possui a parcela positiva tornando-a menor que a constante de fase do modo TEM quando $f > f_c$, e seguindo as definições descritas para este modo $\alpha = 0$, o comprimento de onda no modo TE pode ser descrito como na Equação 2.38, note que $\lambda_{TE} > \lambda$ exceto para quando $f \rightarrow \infty$.

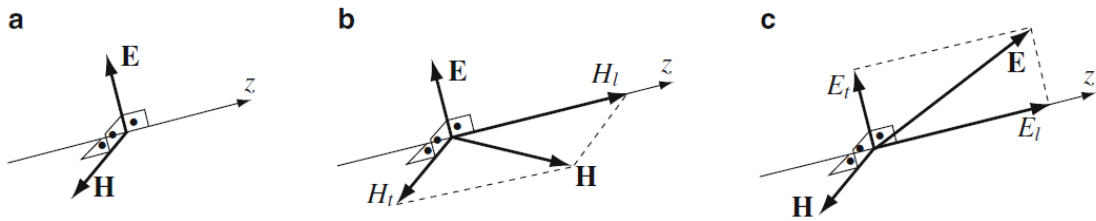
$$\lambda_{TE} = \frac{2\pi}{\alpha - j\beta} = \frac{2\pi}{j\beta_{TE}} = \frac{2\pi}{\omega\sqrt{\mu\epsilon}\sqrt{1 - f_c^2/f^2}} = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - f_c^2/f^2}} \quad (2.38)$$

O modo TM é caracterizado por apresentar um campo elétrico na mesma direção de propagação da onda, ou seja, $H_z = 0$ e $E_z \neq 0$. Desta forma a impedância da onda pode ser descrita como na Equação 2.39. A impedância do modo TE é menor que a impedância do modo TEM, porém quando $f \rightarrow \infty$ as impedâncias se tornam iguais (IDA, 2015).

$$\eta_{TM} = \frac{E_x}{H_y} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \sqrt{1 - \frac{f_c^2}{f^2}} \quad (2.39)$$

Os modos da onda podem ser observados na Figura 2.18, no qual estão demonstrados os campos que compõem cada modo de onda.

Figura 2.18 - Tipos de onda.



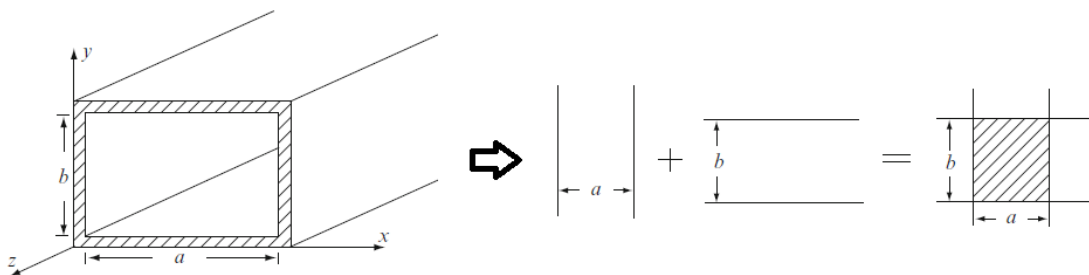
(a) Modo de propagação TEM, (b) modo TE e (c) modo TM.

Fonte: Ida (2015).

2.7.1 Guia de onda retangulares

A interpretação mais simples de um guia de onda retangular pode ser feita considerando-o como dois pares paralelos de planos de guia de onda, sendo um par em posição horizontal e outro em posição vertical, como pode ser visto na Figura 2.19 (IDA, 2015).

Figura 2.19 - Representação esquemática do Guia de Onda retangular e sua associação a dois pares paralelos de planos de Guia de Onda.

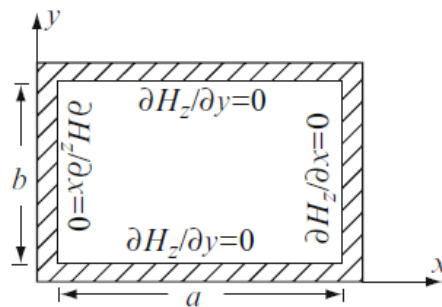


Fonte: Ida (2015).

Afim de discussão para este trabalho, a descrição dos modos de onda dentro de um guia de onda retangular será concentrada apenas ao modo TE.

O modo TE é definido como $E_z = 0$ e $H_z \neq 0$, desta forma a variação do campo magnético nas superfícies do guia de onda se torna zero, como pode ser visto na Figura 2.20.

Figura 2.20 - Condições de contorno do Campo Magnético para o modo TE em um Guia de Onda retangular



Fonte: Ida (2015).

A propagação da componente do campo magnético na direção z pode ser definido como na Equação 2.40, onde n e m são números inteiros e a e b são as constantes dimensionais do guia de onda referentes respectivamente ao eixo x e y . Para o modo TE, a impedância da onda é dada pela razão das componentes transversais do campo elétrico e campo magnético. Desta forma, podemos denotar que para meio sem perdas, a impedância é proporcional a razão direta entre os comprimentos de onda λ e o comprimento de onda no guia λ_g , conforme demonstrado na Equação 2.41 (IDA, 2015; OTT, 2001).

$$H_z(x, y) = H_0 \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-\gamma z} \quad (2.40)$$

$$Z_{TE} = \frac{j\omega\mu}{\gamma} = \frac{\omega\mu}{\beta_g} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \frac{1}{\sqrt{1 - f_{cmn}^2/f^2}} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \frac{1}{\sqrt{1 - \lambda^2/\lambda_{cmn}^2}} = \eta \frac{\lambda_g}{\lambda} \quad (2.41)$$

A densidade de potência da onda no modo TE pode ser calculada considerando as combinações transversais dos campos elétricos e magnéticos, $\hat{x} \times \hat{y} = \hat{z}$ e $\hat{y} \times \hat{x}$

$\hat{x} = -\hat{z}$, resultando em $E_x H_y^*/2$ e $-E_y H_x^*/2$. A potência total do sistema é resultado da soma destes dois componentes. Sendo assim, a potência total em um guia retangular de dimensões a e b , para o modo TE, pode ser simplificada e calculada conforme a Equação 2.42 (IDA, 2015; OTT, 2001).

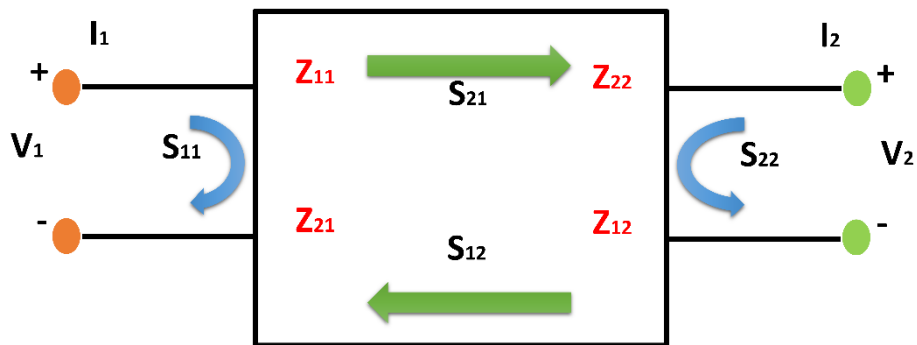
$$P(TE_{10}) = \frac{\omega \mu \beta_g H_0^2 a^3 b}{8\pi^2} \quad (2.42)$$

2.8 Método Nicolson-Ross-Weir

Um desafio das pesquisas que buscam caracterizar materiais eletromagnéticos está na dificuldade de se determinar com exata precisão as propriedades de permissividade complexa e permeabilidade complexas descritas nas Equações 2.10 e 2.11. Uma das formas utilizadas atualmente por diversos softwares é o método referente ao modelo matemático proposto por Nicolson-Ross-Weir (NRW) e que também é conhecido na literatura como Método de Transmissão e Reflexão (AMARAL JUNIOR, 2018).

O método consiste em utilizar os coeficientes de reflexão Γ e de transmissão T , por exemplo, medidos em um Analisador de Rede Vetorial ou em inglês *Vector Network Analyzer* (VNA). E através da análise do sinal emitido, e os sinais transmitidos e refletidos através de uma amostra no interior de um guia de onda, é possível caracterizar as propriedades intrínsecas de permissividade elétrica e a permeabilidade magnética. Dentro do guia de onda, a região de incidência do sinal é denominada de porta incidente, e a região de saída do sinal é denominada porta receptora. E como o objetivo é analisar os sinais transmitidos e refletidos, além de analisar o sinal transmitido que irá chegar na porta receptora, é preciso também analisar o sinal, que retorna à porta emissora, devido ao fenômeno de reflexão (AMARAL JUNIOR, 2018; MARKS, 1997). A Figura 2.21 apresenta uma representação esquemática dos sinais transmitidos e refletidos, o sinal de análise é denominado parâmetro S . O sub-índice do parâmetro S é referente respectivamente a porta receptora do sinal transmitido ou refletido i , e a porta emissora do sinal j . Os sinais S_{ij} com $i = j$ refere-se a sinais de reflexão, e sinais com $i \neq j$ refere-se a sinais de transmissão.

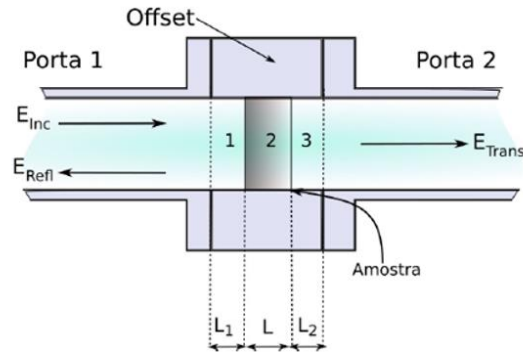
Figura 2.21 - Representação esquemática dos sinais referentes ao parâmetro S dentro de um guia de onda.



Fonte: Produção do autor.

Para utilização do método NRW é necessário estabelecer alguns parâmetros. O material a ser analisado deve ser colocado no guia de onda e então calcula-se o campo elétrico formado em três regiões do guia de onda. As três regiões são demonstradas na Figura 2.22, no qual é possível observar a região 1 com comprimento L_1 e delimitada entre a porta do sinal emitido E_{inc} e a primeira superfície da amostra. A região 2 é referente ao meio interno do material com comprimento L_2 e representa a região no qual ocorre a dissipação da energia da onda dependente da propriedade do material a ser caracterizado. E a região 3 referente a região entre a superfície posterior do material e a porta 2 receptora com comprimento L_3 . Na região 3 o sinal é devido a transmissão da parcela da onda eletromagnética que não foi refletida e nem dissipada (AMARAL JUNIOR, 2018) .

Figura 2.22 - Representação esquemática das regiões do guia de onda delimitadas para utilização do método NRW.



Fonte: Amaral Junior (2018).

Os campos elétricos nas regiões 1, 2 e 3 demonstrados na Figura 2.22 são definidos respectivamente por E_1 , E_2 e E_3 e descritos conforme as Equações 2.43, 2.44 e 2.45 (BAKER-JARVIS; VANZURA; KISSICK, 1990; AMARAL JUNIOR, 2018).

$$E_1 = e^{-\gamma_0 x} + C_1 e^{\gamma_0 x} \quad (2.43)$$

$$E_2 = C_2 e^{-\gamma x} + C_3 e^{\gamma x} \quad (2.44)$$

$$E_3 = C_4 e^{-\gamma_0 x} \quad (2.45)$$

Onde:

$$\gamma_0 = 2\pi j \sqrt{\frac{1}{\lambda^2} - \frac{1}{\lambda_c^2}} \quad (2.46)$$

$$\gamma = \frac{2\pi j}{\lambda} \sqrt{\epsilon_0 \mu_0 - \frac{\lambda^2}{\lambda_c^2}} \quad (2.47)$$

Sendo que:

E_1 , E_2 e E_3 = Campo elétrico dentro de cada região no guia de onda;

C_i = Constantes definidas pelas condições de contorno da geometria da amostra;

γ e γ_0 = Constante de propagação da onda eletromagnética no material e no vácuo respectivamente;

$$j = \sqrt{-1}$$

λ = Comprimento de onda;

λ_c = Comprimento de corte do guia de onda ($\lambda_c = \frac{c}{f_c}$);

ϵ_0 e μ_0 = Permissividade e permeabilidade no vácuo respectivamente.

Ao se utilizar o Analisador de Rede Vetorial, os parâmetros S de reflexão e transmissão, S_{11} e S_{21} , são utilizados nas Equações 2.48 a 2.53, e calculados a partir do coeficiente de reflexão (Γ) e transmissão (T) analíticos (BAKER-JARVIS; VANZURA; KISSICK, 1990).

$$S_{11} = R_1^2 \left[\frac{\Gamma(1 - T^2)}{1 - \Gamma^2 T^2} \right] \quad (2.48)$$

$$S_{21} = R_1 R_2 \left[\frac{T(1 - \Gamma^2)}{1 - \Gamma^2 T^2} \right] \quad (2.49)$$

$$R_1 = e^{-\gamma_0 L_1} \quad (2.50)$$

$$R_2 = e^{-\gamma_0 L_2} \quad (2.51)$$

$$\Gamma = \frac{\left[\frac{\gamma_0}{\mu_0} - \frac{\gamma}{\mu} \right]}{\left[\frac{\gamma_0}{\mu_0} + \frac{\gamma}{\mu} \right]} \quad (2.52)$$

$$T = e^{-\gamma L} \quad (2.53)$$

Onde:

R_1 e R_2 = Expressões para ajustar o plano de referência de S_{11} e S_{21} .

Após obtido os valores do parâmetro S, é possível definir o coeficiente de reflexão segundo o método NRW.

$$\Gamma = K \pm \sqrt{k^2 - 1} \quad (2.54)$$

Onde:

$$K = \frac{S_{11}^2 - S_{21}^2 + 1}{2S_{11}} \quad (2.55)$$

E o coeficiente de Transmissão é dado pela Equação 2.56.

$$T = \frac{S_{11} + S_{21} - \Gamma}{1 - (S_{11} + S_{21})\Gamma} \quad (2.56)$$

E com isso, a permissividade e permeabilidade relativas do material são definidos pelas Equações 2.57 e 2.58 (BAKER-JARVIS; VANZURA; KISSICK, 1990).

$$\epsilon_r = \frac{\lambda_o}{\mu_0} \left[\frac{1}{\lambda_c^2} \left[\frac{1}{2\pi L} \text{Ln}(T^{-1}) \right]^2 \right] \quad (2.57)$$

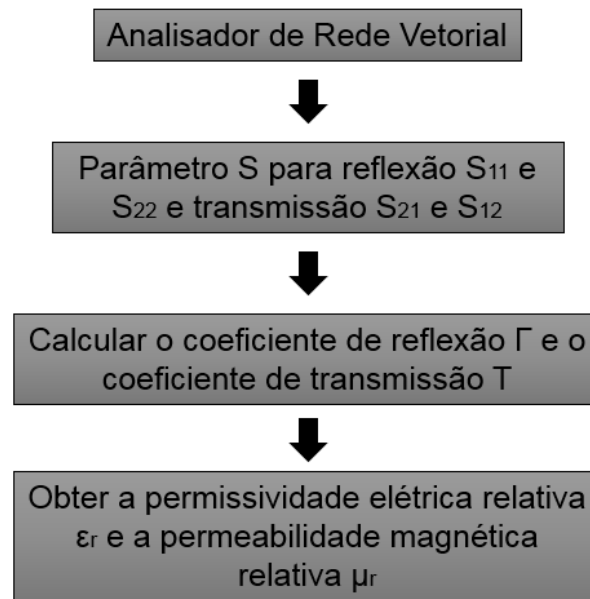
$$\mu_r = \frac{1 + \Gamma}{(1 - \Gamma)\Lambda \sqrt{\frac{1}{\lambda_c^2} - \frac{1}{\lambda_c}}} \quad (2.58)$$

Onde:

$$\Lambda = j \frac{L}{2\pi \text{Ln}(T^{-1})} \quad (2.59)$$

As Equações 2.57 e 2.58 possibilitam calcular a permissividade e permeabilidade relativos em materiais homogêneos e isotrópicos. A Figura 2.23 demonstra os procedimentos para obtenção da permissividade elétrica relativa e a permeabilidade magnética relativa utilizando o método NRW. Vale lembrar que ao se determinar tais propriedades, deve-se sempre considerar os erros nas dimensões das amostras e outros erros na medição dos componentes para as equações. Devido aos defeitos do material, os valores teóricos podem se diferir dos valores práticos.

Figura 2.23 - Fluxograma Resumido do Método NRW



Fonte: Produção do autor.

2.9 Propriedades eletromagnéticas

Ao atravessar um determinado material, a onda eletromagnética promove uma perturbação aos portadores de cargas no interior do mesmo. A variação do estado perturbado é relacionada à polarização e/ou magnetização do meio definido pela literatura como permissividade elétrica complexa, $\varepsilon(\omega) = \varepsilon'(\omega) - j\varepsilon''(\omega)$, e permeabilidade magnética complexa, $\mu(\omega) = \mu'(\omega) - j\mu''(\omega)$. No qual a parcela real das mesmas é relacionada a fenômenos capacitivos e as parcelas imaginária à fenômenos dissipativos.

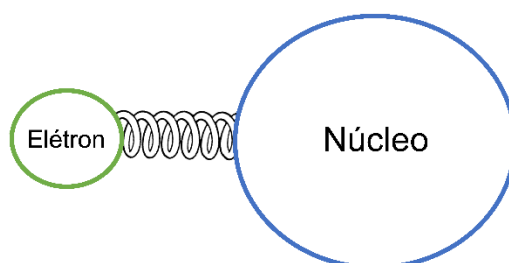
Para estudo do comportamento de tais propriedades, o Modelo de Lorentz é utilizado afim de quantificar os fenômenos participativos em cada parâmetro das propriedades, parcela real e imaginária, e com isso calcular o valor resultante.

2.9.1 Modelo de Lorentz

Ao final do século 19, o físico holandês Hendrik Antoon Lorentz apresentou estudos sobre a interação de átomos e elétrons em função de um campo elétrico. Lorentz propôs que ao analisar a interação entre um elétron e o núcleo de um

átomo, estes formam um sistema massa-mola. Na presença de campo elétrico externo, considerasse que apenas o elétron sofra deslocamento em sua posição pois este possui uma massa muito inferior ao núcleo do átomo. O deslocamento do elétron entorno do núcleo é comparado a um sistema no qual o elétron está ligado ao núcleo do átomo por uma mola (AMARAL JUNIOR, 2018; ORFANIDIS, 2008). Uma representação esquemática da interação entre elétron e o núcleo do átomo pode ser visto na Figura 2.24.

Figura 2.24 - Representação esquemática referente a analogia da ligação entre um elétron com o núcleo do átomo proposto por Lorentz.



Fonte: Produção do autor.

Seguindo a associação da ligação elétron-núcleo conforme uma mola, a força de ligação entre o elétron e o núcleo segue a lei de Hooke $F = -k\Delta l$, sendo F é a força aplicada, k é a constante elástica do material e Δl é a deformação devido ao deslocamento do elétron.

A Equação 2.60 apresenta a relação proposta por Lorentz, no qual a força aplicada é a força elétrica \vec{F}_e e que resulta em um deslocamento em função da carga q do elétron e do campo elétrico \vec{E} na direção \hat{y} . O sinal negativo na igualdade é devido ao deslocamento estar se opondo a direção da força elétrica aplicada.

$$\vec{F}_e = -q\vec{E}\hat{y} \quad (2.60)$$

Em um meio material ao se aplicar um campo elétrico, os elétrons de um átomo sofrem uma distorção de sua posição em relação a direção do campo aplicado

devido a força elétrica do mesmo. A variação na posição de cada elétron, denominada polarização, segue o modelo proposto por Lorentz como um oscilador harmônico amortecido e forçado. O modelo de Lorentz é utilizado para descrever matematicamente o comportamento dos elétrons em relação ao núcleo do átomo e é utilizado na fundamentação das equações da permissividade elétrica de um meio material. A descrição do comportamento de um oscilador harmônico amortecido e forçado permite descrever as parcelas real e imaginária da propriedade elétrica seguindo as Equações 2.61 e 2.62 (ORFANIDIS, 2008; BALANIS, 1938).

$$\varepsilon' = \varepsilon_0 + \sum_{j>i}^n \frac{\varepsilon_0 \omega_p^2 (\omega_0^2 - \omega^2)}{(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + \gamma^2 \omega^2} \quad (2.61)$$

$$\varepsilon'' = \sum_{j>i}^n \frac{\varepsilon_0 \omega_p^2 \omega \gamma}{(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + \gamma^2 \omega^2} \quad (2.62)$$

Onde,

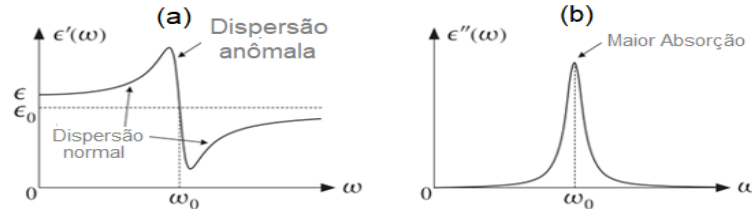
$$\omega_p = \sqrt{\frac{Ne^2}{\varepsilon_0 m_i}} \quad (2.63)$$

O termo ω_p é denominado como frequência de plasma e é definido pela frequência no qual os elétrons de condução ressonam, esta depende do número de dipolos gerados no meio material N , da carga do elétron e , da permissividade elétrica no vácuo ε_0 e da massa dos elétrons envolvidos m_i . A taxa de relaxação dos portadores de carga γ é dada pelo inverso do tempo de relaxação ($1/\tau$), e ω_0 é a frequência natural de ressonância do material.

A identificação da frequência de ressonância é representada por uma variação característica no padrão de comportamento tanto da componente capacitiva ε' quanto da componente dissipativa ε'' da permissividade elétrica. A Figura 2.25 apresenta que a frequência de ressonância ω_0 referente ao ponto de inflexão na curva da componente capacitiva ε' coincide com a frequência no pico da curva da componente dissipativa ε'' . Na frequência de ressonância do meio material ocorre a maior perda de energia por dissipação devido a defasagem da

polarização dos elétrons do meio em relação a fase da onda incidente (ORFANIDIS, 2008).

Figura 2.25 - Componentes capacitivas e dissipativas da permissividade elétrica $\varepsilon(\omega)$ em função da frequência



Fonte: Adaptado de Orfanidis (2008).

De forma similar ao modelo de Lorentz para descrever a permissividade elétrica, é possível definir matematicamente a permeabilidade magnética em função de alguns parâmetros. Contudo, é encontrado na literatura a junção do modelo proposto por Lorentz e o modelo sobre cinética de elétrons em um sólido, proposto por Paul Drude. A permeabilidade magnética pode ser descrita considerando os fenômenos no interior das bandas, proposto por Drude, e os fenômenos entre transições de bandas elétricas, proposto por Lorentz. Tal modelo é denominado como Drude-Lorentz e é descrito conforme a Equação 2.64 (LI, 2017).

$$\mu_r(\omega) = 1 + \frac{\omega_p^2}{\omega_{0m}^2 + \omega^2 + j\gamma_m \omega} \quad (2.64)$$

Onde, ω_{0m} é a frequência de ressonância magnética e γ_m é a constante de amortecimento dos dipolos magnéticos.

Em um sistema no qual seja possível múltiplas ordens de ressonâncias magnéticas, o modelo pode ser estendido para a Equação 2.65.

$$\mu_r(\omega) = 1 + \sum_{k=1}^M \frac{\omega_{pmk}^2}{\omega_{0mk}^2 - \omega^2 - j\gamma_{mk} \omega} \quad (2.65)$$

Onde, ω_{pmk} corresponde a frequência de plasma ressonante dos dipolos magnéticos de k ordens, ω_{0mk} é a componente ressonante com k ordens dos momentos magnéticos, γ_{mk} é a constante de amortecimento dos dipolos magnéticos com k ordens.

2.9.2 Condutividade elétrica em regime alternado

Entre os fenômenos dissipativos, a condutividade elétrica é uma propriedade que demonstra grande influência no comportamento resultante do material. A quantidade de energia dissipada devido a polarização elétrica em um determinado material, em forma de fluxo de elétrons, é definida como condutividade elétrica efetiva σ_{ef} . E esta é composta pela condutividade em regime constante σ_{dc} e alternável ou variável σ_{ac} . A condutividade é dependente da velocidade angular ω conforme a Equação 2.66, onde f é a frequência da onda eletromagnética (KHURRAM et al., 2015; SAINI; ARORA, 2012)

$$\sigma_{ef}(\omega) = \sigma_{dc} + \sigma_{ac} = \omega \varepsilon_0 \varepsilon_r'' = 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon_r'' \quad (2.66)$$

A Tabela 2.2 demonstra alguns valores de condutividades utilizados como referências. Entre os materiais condutores, se encontram a maioria dos metais, entre os semicondutores se encontram algumas cerâmicas e materiais compósitos, e entre os isolantes se encontram alguns polímeros (CARTER; NORTON, 2013).

Tabela 2.2 - Condutividade efetiva de alguns materiais.

Material	Condutividade (S/m)
Condutores	$> 10^6$
Semicondutores	10^{-1} e 10^2
Isolantes	$< 10^{-6}$

Fonte: Produção do autor.

A condutividade σ de um determinado meio material é resultante da quantidade de elétrons que podem ser excitados e responder ao campo elétrico externo \vec{E}_{ext} . A intensidade da condutividade é definida pela quantidade de população de elétrons e a facilidade de respostas destes, e conforme a mobilidade dos elétrons na estrutura define o livre caminho médio dos elétrons. Este livre caminho médio relaciona a distância percorrida e a possibilidade de colisões entre os elétrons. O tempo entre as colisões é definido como tempo de relaxação τ , e é utilizado para descrever uma relação entre a corrente elétrica induzida \vec{J} em função de um determinado \vec{E}_{ext} . Esta relação também depende do número de elétrons n , da carga do elétron q , e da massa do elétron m , conforme descrito na Equação 2.67.

$$\vec{J} = \frac{nq^2\tau}{m}\vec{E}_{ext} = \sigma\vec{E}_{ext} \quad (2.67)$$

2.10 Tangente de perda elétrica e tangente de perda magnética

A relação entre a componente imaginária e a componente real da permissividade é denominado fator de perda elétrica δ_ϵ , e descrito matematicamente conforme a Equação 2.68. De forma semelhante, a relação entre a parcela imaginária e real da permeabilidade é definida como fator de perda magnética δ_μ e é descrito conforme a Equação 2.69 (SHAO et al., 2018). Segundo a literatura, δ_ϵ denota relativamente a quantidade de energia dissipada em forma de calor em relação a polarização no interior de um determinado material, e δ_μ denota relativamente a energia dissipada entre a defasagem do campo aplicado e o induzido no interior do material (SHAO et al., 2018; LI et al., 2018a; GAO; WU; QIU, 2018) .

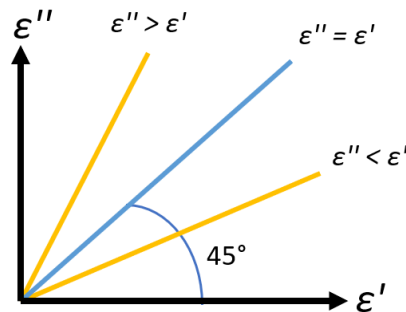
$$\tan \delta_\epsilon = (\epsilon'' / \epsilon') \quad (2.68)$$

$$\tan \delta_\mu = (\mu'' / \mu') \quad (2.69)$$

Os valores da tangente da razão são denominados tangente de perdas elétrica $\tan \delta_\epsilon$ e tangente de perda magnética $\tan \delta_\mu$. No qual seu valor é comparado na literatura com o valor médio da tangente referente ao ângulo de 45° ou 0,785 radianos. Os materiais com valores superiores a estes valores de

referência são considerados materiais com capacidade de dissipação de energia, nesta classificação se encontram os materiais metálicos. Os materiais com valores inferiores ao de referência são definidos como materiais com caráter capacitivo, e nesta classificação se encontram os materiais dielétricos. Os materiais com valores iguais ao de referência são definidos como materiais de regime ideal capacitivo e dissipativo (ORFANIDIS, 2008). A relação da tangente de perda e a classificação do regime do material é demonstrado na Figura 2.26.

Figura 2.26 - Relação da razão entre a parcela real e imaginária da permissividade.



Fonte: Produção do autor.

2.11 Relação entre a equação de propagação e as propriedades do meio material.

A descrição da equação de propagação já foi anteriormente discutida no tópico 2.6.2 e definida conforme a Equação 2.27 ($\gamma = \alpha + j\beta$), contudo é importante descrever a relação desta equação com as propriedades de permissividade e permeabilidade descritas no tópico 2.9. A equação de propagação de onda em um meio material com perdas, base deste trabalho, é dependente de um fator atenuador (α) e um fator de fase (β). E, ambos fatores são resultados das propriedades do meio material conforme descrito nas Equações 2.70 e 2.71, e podem ser relacionados ao fator de perda $\tan \delta_\epsilon$ (ULABY, 2007).

$$\alpha = \omega \left\{ \frac{\mu\varepsilon'}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}\right)^2} - 1 \right] \right\}^{1/2} = \omega \left\{ \frac{\mu\varepsilon'}{2} \left[\sqrt{1 + (\tan \delta_\varepsilon)^2} - 1 \right] \right\}^{1/2} \quad (2.70)$$

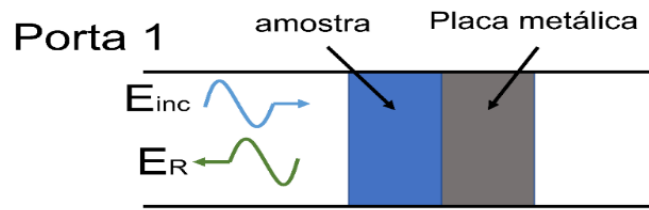
$$\beta = \omega \left\{ \frac{\mu\varepsilon'}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}\right)^2} + 1 \right] \right\}^{1/2} = \omega \left\{ \frac{\mu\varepsilon'}{2} \left[\sqrt{1 + (\tan \delta_\varepsilon)^2} + 1 \right] \right\}^{1/2} \quad (2.71)$$

A segunda igualdade da Equação 2.70 sugere que se o meio material apresenta caráter predominantemente capacitivo e sem perdas ($\tan \delta_\varepsilon \approx 0$), o fator $[\sqrt{1 + (\tan \delta_\varepsilon)^2} - 1]$ tende a 0, e assim o sistema não apresenta atenuação resultante ($\alpha = 0$). Nesta descrição se encontram os materiais poliméricos dielétricos (exemplo: silicone) e o ar.

2.12 Ensaio de refletividade

Além do Método de Reflexão e Transmissão descrito no tópico 2.8 deste trabalho para utilização do NRW, o método da refletividade também se mostra muito importante afim de caracterizar o potencial de absorção de um material (XIA et al., 2018; XU et al., 2018; YAN et al., 2018a). A unidade utilizada para descrever a refletividade é a escala decibel, na qual a razão de argumentos que denota esta escala está descrita no Apêndice A deste trabalho. Este método consiste em colocar o material que se deseja caracterizar dentro do guia de onda, porém com um material metálico posterior a sua segunda superfície do material. Neste método, o material metálico localizado atrás da amostra não permite que ocorra o fenômeno de transmissão, desta forma apenas a porta emissora de sinal irá receber a resposta do sistema. O sinal de resposta, devido a reflexão E_R , é comparado ao sinal emitido E_{inc} , e sua diferença é dito como potencial de absorção do material (AMARAL JUNIOR, 2018). O sistema material/placa metálica é demonstrado na Figura 2.27.

Figura 2.27 - Representação esquemática do método de refletividade.



Fonte: Produção do autor.

Para o presente trabalho, a escala decibel representa a razão entre o potencial refletido E_R e o potencial incidente E_{inc} conforme descrito na Equação 2.72 (MA et al., 2018; XU; WANG; YIN, 2018) .

$$Refletividade (dB) = 20 \log_{10} \left(\frac{E_R}{E_{in}} \right) \quad (2.72)$$

O valor em decibel referente a razão de potenciais é resultante ao sinal refletido pelo material e pela placa metálica, desta forma atribui-se o sinal não refletido ao fenômeno de absorção causado pelo meio material analisado. A relação do valor em decibel e a respectiva porcentagem de energia absorvida pode ser calculada através da Equação 2.72 e descrito conforme Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Relação entre a escala decibel e percentual de energia absorvida.

Atenuação (dB)	% energia absorvida
0	0
- 3	50
- 10	90
- 15	96,9
- 20	99
- 30	99,9
- 40	99,99

Fonte: Produção do autor.

A refletividade se baseia no fenômeno de reflexão e absorção, porém o potencial de absorção deve ser calculado indiretamente como sinal não refletido. Devido a isso, a descrição matemática do comportamento do material é feita a partir do coeficiente de reflexão, descrito na Equação 2.31, e as propriedades do meio material conforme descrito nas Equações 2.73 e 2.74 (MA et al., 2018; XU; WANG; YIN, 2018).

$$\text{Refletividade}(dB) = 20 \log_{10} \left| \frac{\eta_{in} - 1}{\eta_{in} + 1} \right| \quad (2.73)$$

$$\eta_{in} = \sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}} \tanh \left(j \frac{2\pi f}{c} t \sqrt{\mu_r \varepsilon_r} \right) \quad (2.74)$$

Onde η_{in} é a impedância do meio material, t é a espessura da amostra, e c é a velocidade da luz.

3 METODOLOGIA

3.1 Condições e etapas do processamento do material compósito

Neste trabalho foram preparadas amostras baseadas na junção de particulados magnéticos dispersos em matrizes dielétricas. Para isto, foi utilizada a Ferrita de Manganês e Zinco com fórmula $Mn_{0,56}Zn_{0,44}Fe_2O_4$, com massa específica de $5,029 \text{ g/cm}^3$, e disponibilizado comercialmente pela empresa R. SONTANG S.A.. Também foi utilizada a ferrocarbonila, com massa específica de $7,65 \text{ g/cm}^3$, disponibilizado comercialmente pela empresa BASF.

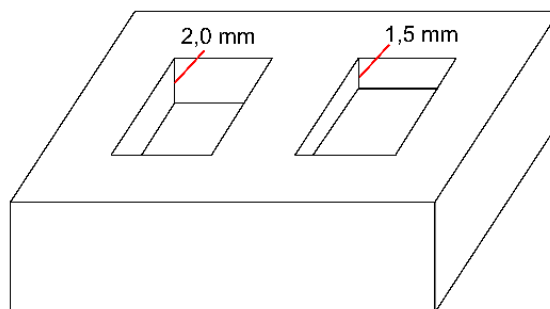
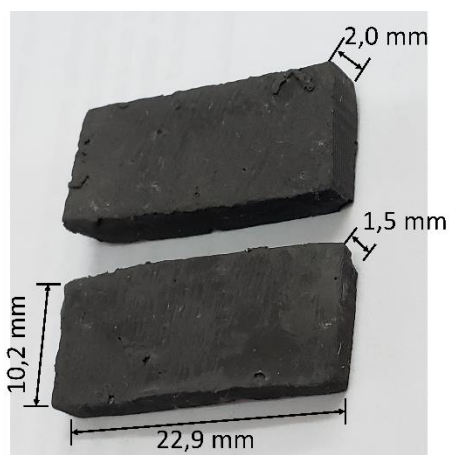
O material para compor a matriz dielétrica foi a Borracha de Silicone branca PS com massa específica de $1,26 \text{ g/cm}^3$, e seu respectivo agente de cura Catalisador PS1 FR 300, ambos disponibilizados comercialmente pela empresa REDELEASE. O agente de cura foi utilizado na proporção de 5% em massa em relação a quantidade de massa apenas do silicone, e a etapa de cura foi feita em temperatura ambiente.

Com base no trabalho desenvolvido por Gama (2009) optou-se por 5 concentrações em massa de particulados magnéticos dispersos de forma aleatória e homogênea na matriz dielétrica. As concentrações variaram entre 30% e 70% com variação de 10% entre as amostras. A quantidade de material utilizado foi aferida através de uma balança analítica modelo FA-2204 da empresa SCALE com precisão de 4 algarismos significativos. As amostras foram produzidas nas dimensões do guia de onda retangular acoplado a um Analisador de Rede Vetorial, de $22,9 \text{ mm} \times 10,2 \text{ mm}$ e em duas espessuras de $1,5 \text{ mm}$ e $2,0 \text{ mm}$, como pode ser visto na Figura 3.1 (a). As dimensões das amostras foram garantidas a partir das dimensões do molde utilizado, este é representado esquematicamente na Figura 3.1 (b) e foi produzido em material de Políácido láctico (PLA) e impresso em impressora Creality 3D modelo CR-10. O molde foi processado com duas cavidades com profundidades referentes a $1,5 \text{ mm}$ e $2,0 \text{ mm}$. A precisão nas dimensões do molde utilizado, devido a impressora 3D, foi de $0,01 \text{ mm}$.

Figura 3.1 - Representação das dimensões das amostras.

(a)

(b)



(a) Fotografia das amostras e suas dimensões, (b) representação esquemática do molde.

Fonte: Produção do autor.

As 5 concentrações escolhidas para este trabalho estão descritas na Tabela 3.1 em função da quantidade percentual de massa e de volume. Em paralelo a análise da presença dos particulados na matriz, optou-se por sintetizar amostras sem adição de material magnético. Este material sem aditivo é definido na Tabela 3.1 pelo número zero de porcentagem (0%) de particulado, ou seja, composto somente pelo material silicone dielétrico.

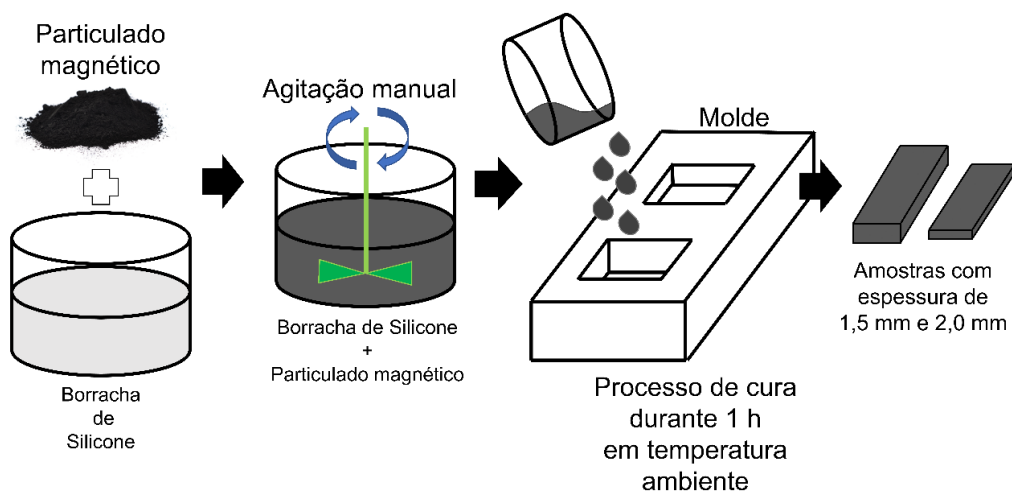
Tabela 3.1 - Concentrações em massa e em volume utilizadas nas preparações das amostras.

% Massa do material magnético	% Volume	
	Ferrocarbonila	Ferrita MnZn
0	0	0
30	6,7	9,8
40	10,0	14,5
50	14,3	20,2
60	20,0	27,6
70	28	37,2

Fonte: Produção do autor.

O processamento das amostras do presente trabalho se baseia na junção de particulados magnéticos nas concentrações descritas, dispersos em uma matriz de borracha de silicone. A dispersão dos particulados foi realizada sob agitação manual até uma visível homogeneização predominante da coloração dos particulados. O processo de agitação ocorreu entorno de 2 a 4 minutos e sem a presença do agente de cura. Posteriormente a uma visível homogeneização, foi colocado o agente de cura na proporção de 5% em relação a massa do silicone e o sistema polimérico foi depositado de forma homogênea no interior do molde. As etapas do processo de produção das amostras estão representadas na Figura 3.2.

Figura 3.2 - Etapas do processamento do material compósito.



Fonte: Produção do autor.

3.2 Caracterização estrutural e morfológica

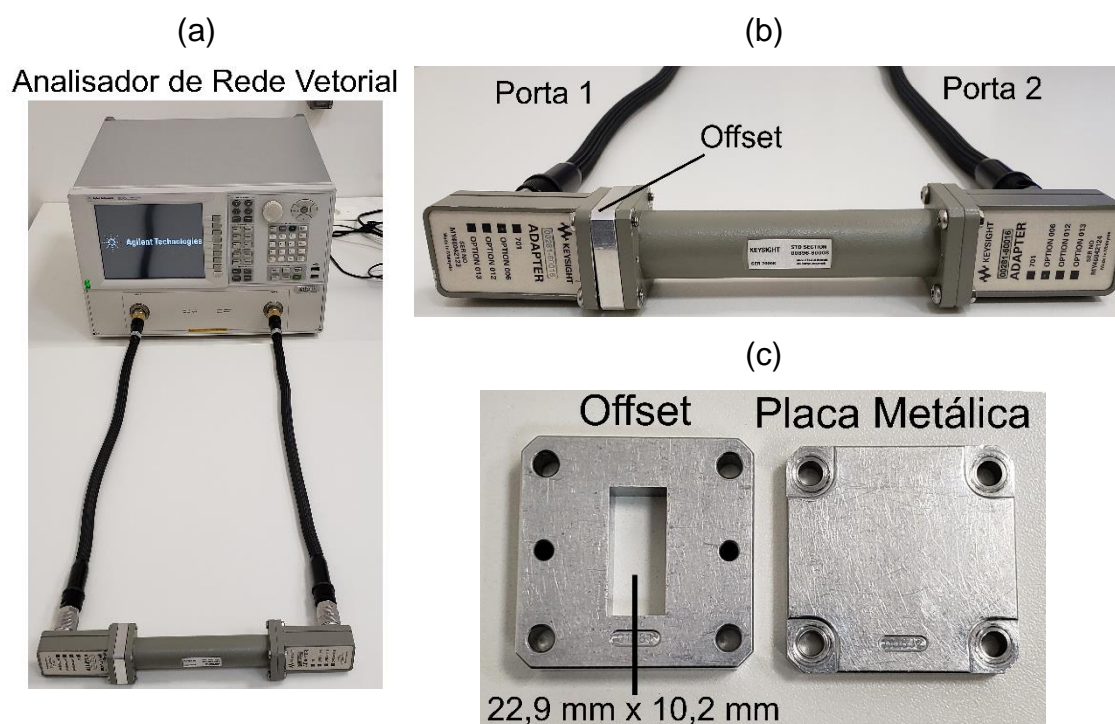
A primeira etapa deste trabalho consistiu em caracterizar a estrutura cristalina e a morfologia dos materiais magnéticos na forma de particulados. Afim disto, foram utilizados um Difratorômetro de Raio X (DRX) modelo X'Pert PRO da empresa PanAnalytic utilizando um eletrodo de Cobre - Cu K α com comprimento de onda de 1,56 Å. A caracterização morfológica foi realizada em um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) acoplado a um canhão de emissão de campo ou também conhecido pela sigla em inglês FEG (*foton emission gun*), modelo Mira 3 da empresa TESCAN. A microscopia eletrônica de varredura foi realizada utilizando o sensor de elétrons espalhados com potencial de emissão de 5 KV. A fundamentação de cada técnica está brevemente descrita nos Apêndices B e C deste trabalho.

3.3 Caracterização eletromagnética

A segunda etapa deste trabalho consistiu em utilizar os compósitos à base de particulados de ferrita de manganês e zinco e ferrocarbonila nas concentrações em massa de 30%, 40%, 50%, 60% e 70%. A análise eletromagnética foi realizada através de um Analisador de Redes Vetorial, modelo N5232A da empresa *Agilent Technologies*. A caracterização eletromagnética foi realizada

afim de identificar os valores de permissividade elétrica e permeabilidade magnética dos materiais propostos na Tabela 3.1 ao longo da faixa de frequência referente à Banda X, de 8,2 a 12,4 GHz. As análises foram feitas em um guia de onda retangular do Kit X11644A acoplado por adaptadores a cabos transmissores de 3.5 mm com impedância de 50Ω. Foi utilizado o modo de propagação da onda eletromagnética TE_{10} descrito no tópico 2.7.1 deste trabalho. A Figura 3.3 apresenta (a) o Analisador de Rede vetorial acoplado aos cabos transmissores e (b) o sistema de montagem da peça suporte ao material a ser analisado, denominado *offset*. A Figura 3.3 (c) apresenta a vista frontal do *offset* indicando os valores de sua dimensão interna, valores estes que definem as dimensões das amostras, e também a placa metálica utilizada no método de medição de Refletividade.

Figura 3.3 - Componentes do sistema de caracterização eletromagnética



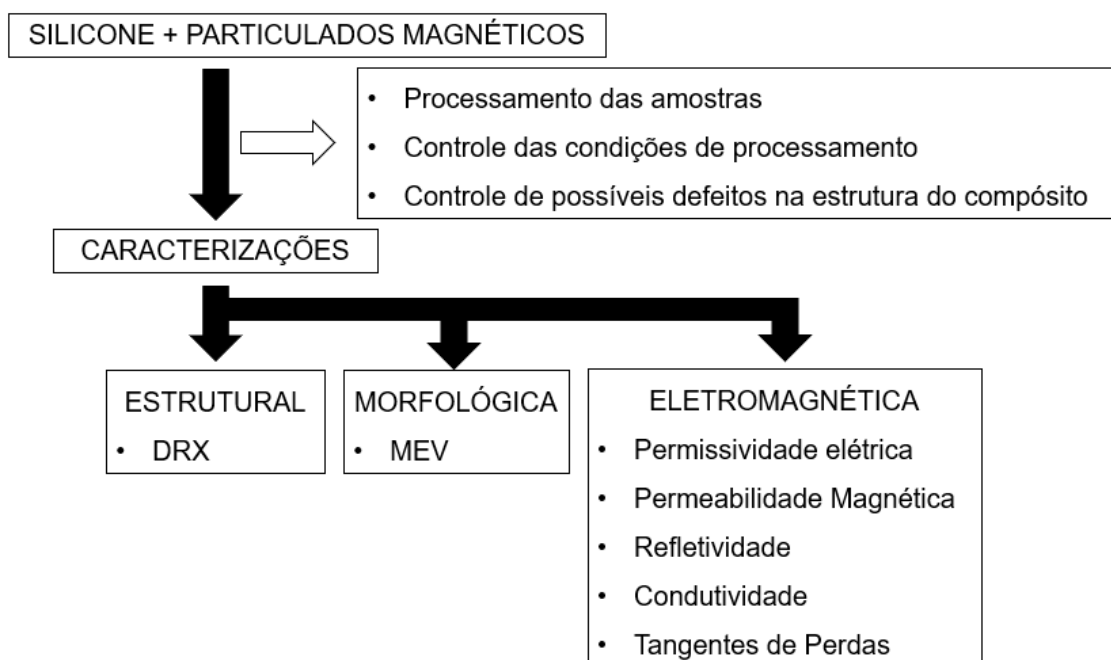
(a) Analisador de Rede Vetorial acoplado aos cabos transmissores e ao guia de onda retangular, (b) Sistema de montagem do guia de onda retangular com os adaptadores dos cabos transmissores, e (c) Vista frontal do *offset* e da placa metálica.

Fonte: Produção do autor.

Durante esta caracterização foram medidos os valores dos Parâmetros S. A partir do algoritmo NRW, o software “*Keysight Materials Measurement Suite 2015*” associado ao VNA calculou os valores das permissividades elétricas e permeabilidades magnéticas. Em paralelo foi utilizado a placa metálica do Kit X11644A para caracterização do potencial de absorção dos compósitos utilizando o método de refletividade conforme descrito anteriormente no item 2.12.

O fluxograma das etapas desenvolvidas na metodologia deste trabalho estão apresentadas na Figura 3.4.

Figura 3.4 - Fluxograma das etapas desenvolvidas na metodologia.



Fonte: Produção do autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização morfológica

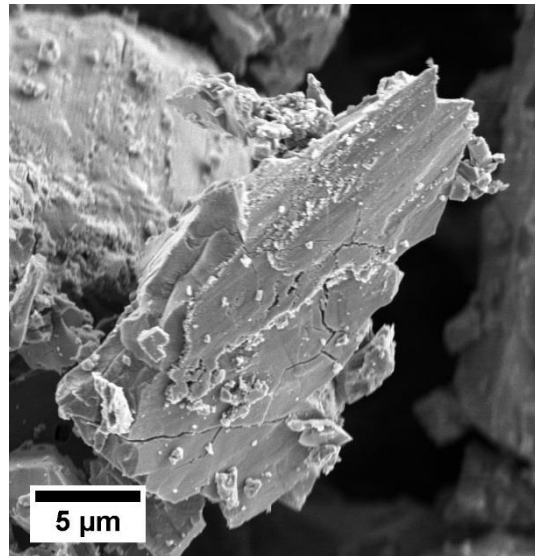
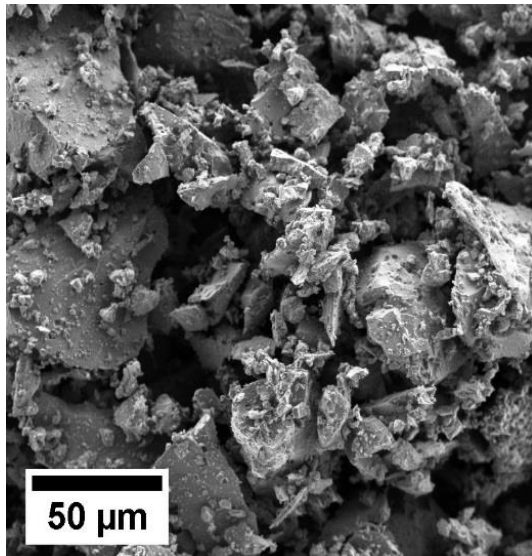
A Caracterização morfológica realizada através do MEV está apresentada nas Figuras 4.1 e 4.2 respectivamente para os particulados de ferrita MnZn e ferrocarbonila, ambos posicionados no equipamento utilizando uma fita de carbono condutora. É possível observar que os particulados de ferrita MnZn apresentam formato de placas com comprimento de 10 a 50 μm . E os particulados de ferrocarbonila apresentam formato de esferas com diâmetro de 1 a 6 μm .

A distribuição dos particulados na matriz polimérica se demonstrou dependente da geometria e volume dos mesmos, devido ao sistema Ferrita MnZn/silicone apresentar maior viscosidade que o sistema ferrocarbonila/silicone. O nível de viscosidade resultante da adição dos particulados não prejudicou o processamento das amostras. Contudo, foi observado que a concentração de 70% de ferrita MnZn demonstrou dificuldade em ser distribuída de forma homogênea ao longo da matriz. A dificuldade demonstrada por particulados com geometria de placas resultou em uma aparência menos lisa, indicando uma necessidade de maior controle em seu processamento em termos do acabamento da superfície do compósito.

Figura 4.1 - MEV dos particulados de ferrita MnZn.

(a)

(b)



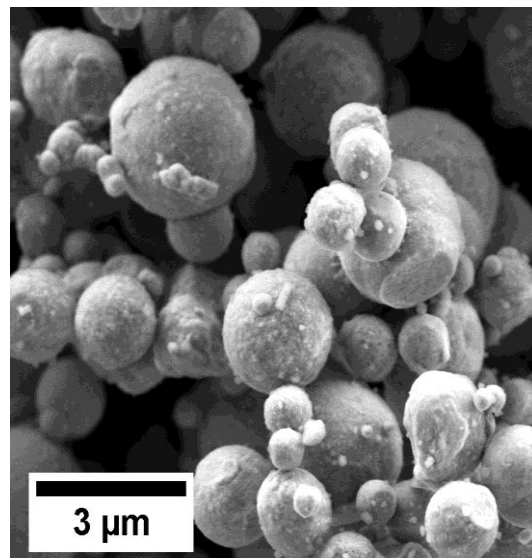
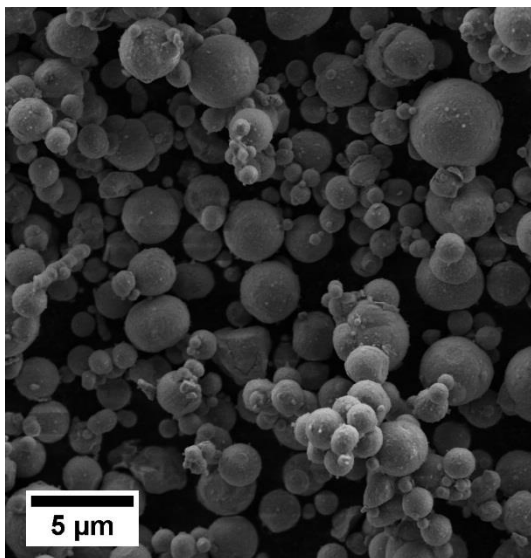
Aumentos de (a) 1000x e (b) 10000x.

Fonte: Produção do autor.

Figura 4.2 - MEV dos particulados de ferrocarbonila

(a)

(b)



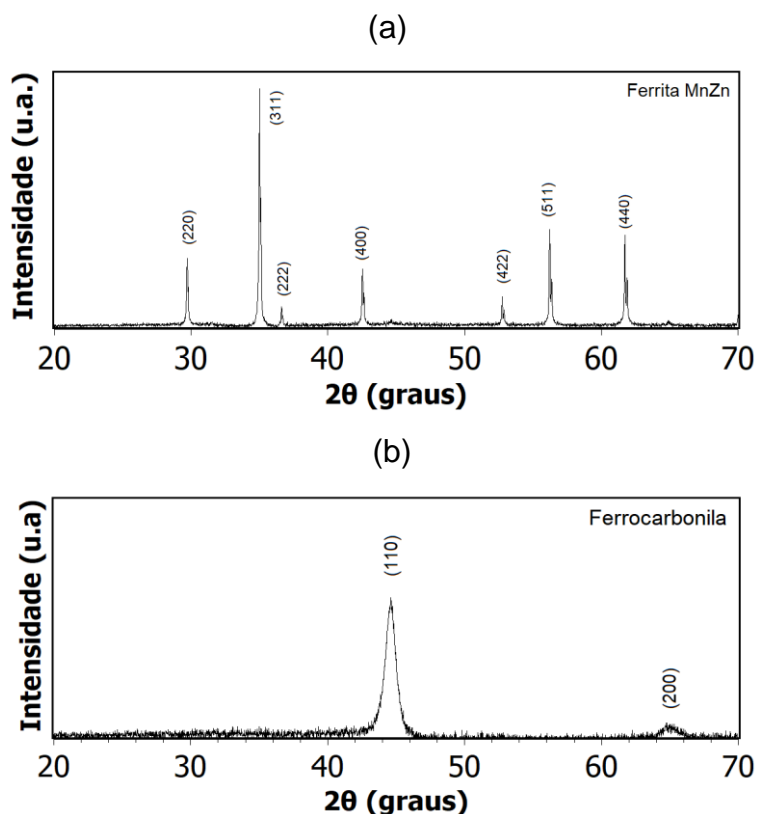
Aumentos de (a) 1000x e (b) 20000x.

Fonte: Produção do autor.

4.2 Caracterização estrutural

A caracterização estrutural realizada no DRX é demonstrada na Figura 4.3. É possível identificar que a ferrita MnZn possui a fase espinélio. A identificação desta fase é realizada através da relação dos picos encontrados em $29,72^\circ$, $35,00^\circ$, $36,61^\circ$, $42,52^\circ$, $52,88^\circ$, $56,38^\circ$ e $61,62^\circ$, referentes aos planos 220, 311, 222, 400, 422, 511 e 440, respectivamente (BEGUM et al., 2018; RATH et al., 1999). A Figura 4.3 (b) demonstra que a ferrocarbonila possui a estrutura cúbica característica do ferro- α , a estrutura de corpo centrado (CCC). A identificação desta fase é devido aos picos em $44,58^\circ$ e $64,62^\circ$ referentes aos planos 110 e 200 (VINOD; JOHN; PHILIP, 2017; FENG; QIU; SHEN, 2007). As fichas cristalográficas referentes as análises sobre os difratogramas dos particulados de ferrita MnZn e ferrocarbonila estão apresentadas no Apêndice D.

Figura 4.3 - DRX dos particulados.



(a) Particulados de ferrita MnZn e (b) Particulados de ferrocarbonila.

Fonte: Produção do autor.

A estrutura espinélio da ferrita é denotada como uma estrutura mais complexa do que a estrutura CCC. A estrutura cerâmica demonstra posições octaédricas e tetraédricas preenchidas diferentemente da estrutura CCC. Esta diferença no posicionamento e preenchimento dos espaços vazios permite a incorporação do Mn e do Zn em sua estrutura. Este fato também é influenciado devido a estrutura espinélio possuir menor fator de empacotamento e com isso permitir o rearranjo de átomos diferentes ao Fe. O comportamento eletromagnético resultante de ambos materiais depende diretamente da interação entre os átomos devido a suas posições (LI et al., 2018b; CAO et al., 2019). Sendo assim, a síntese e de óxidos permite a adição de outros átomos (exemplo: cátions) em diferentes posições na estrutura cristalina possibilitando uma manipulação das propriedades, o que não é possível em sua forma metálica na estrutura metálica. A exemplo, a estrutura espinélio pode ser manipulada para uma estrutura espinélio invertida mudando de posições alguns cátions e consequentemente apresentando diferentes propriedades.

4.3 Caracterização eletromagnética

A caracterização eletromagnética foi realizada nas amostras compostas por silicone e particulados de ferrita MnZn e ferrocobalita. O comportamento eletromagnético foi dividido a seguir entre as propriedades do meio, permissividade, permeabilidade e condutividade.

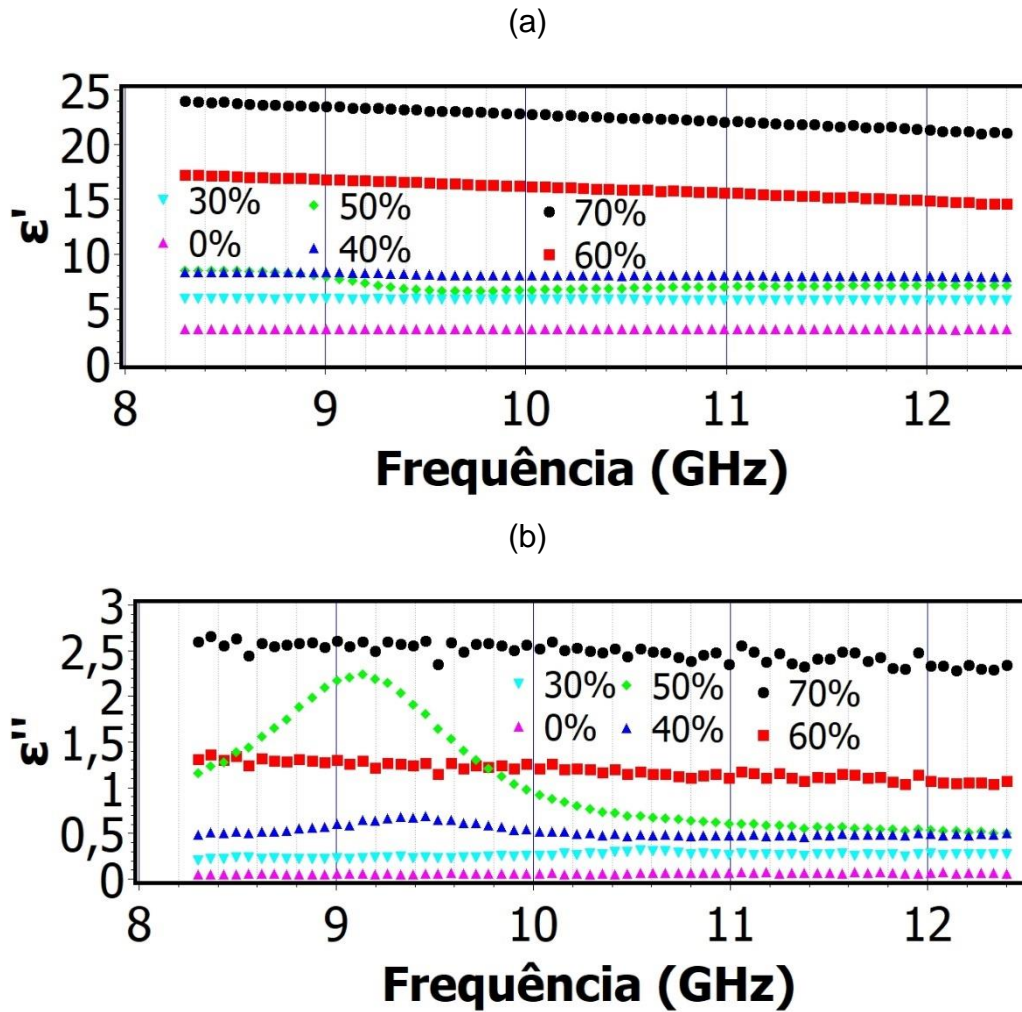
Posteriormente está demonstrado o potencial de absorção devido ao método de refletividade, e, em continuidade uma discussão em relação ao meio e suas tangentes de perdas elétricas e magnéticas.

4.3.1 Permissividade elétrica das amostras de ferrita MnZn

As permissividades elétricas complexas das amostras de ferrita MnZn foram obtidas utilizando o algoritmo NRW descrito no item 2.8. As permissividades foram calculadas pelo software associado ao VNA e estão apresentadas nas Figuras 4.4 e 4.5. Os resultados apontam que o aumento da concentração de ferrita MnZn gerou um aumento na parcela real ϵ' para ambas espessuras. A presença de ferrita MnZn resultou em um grande aumento na capacidade de

armazenamento de energia, variando entre o valor 2 da matriz pura (0%) para valores de 24 e 17 para concentração de 70%, referentes as espessuras de 1,5 mm e 2,0 mm respectivamente.

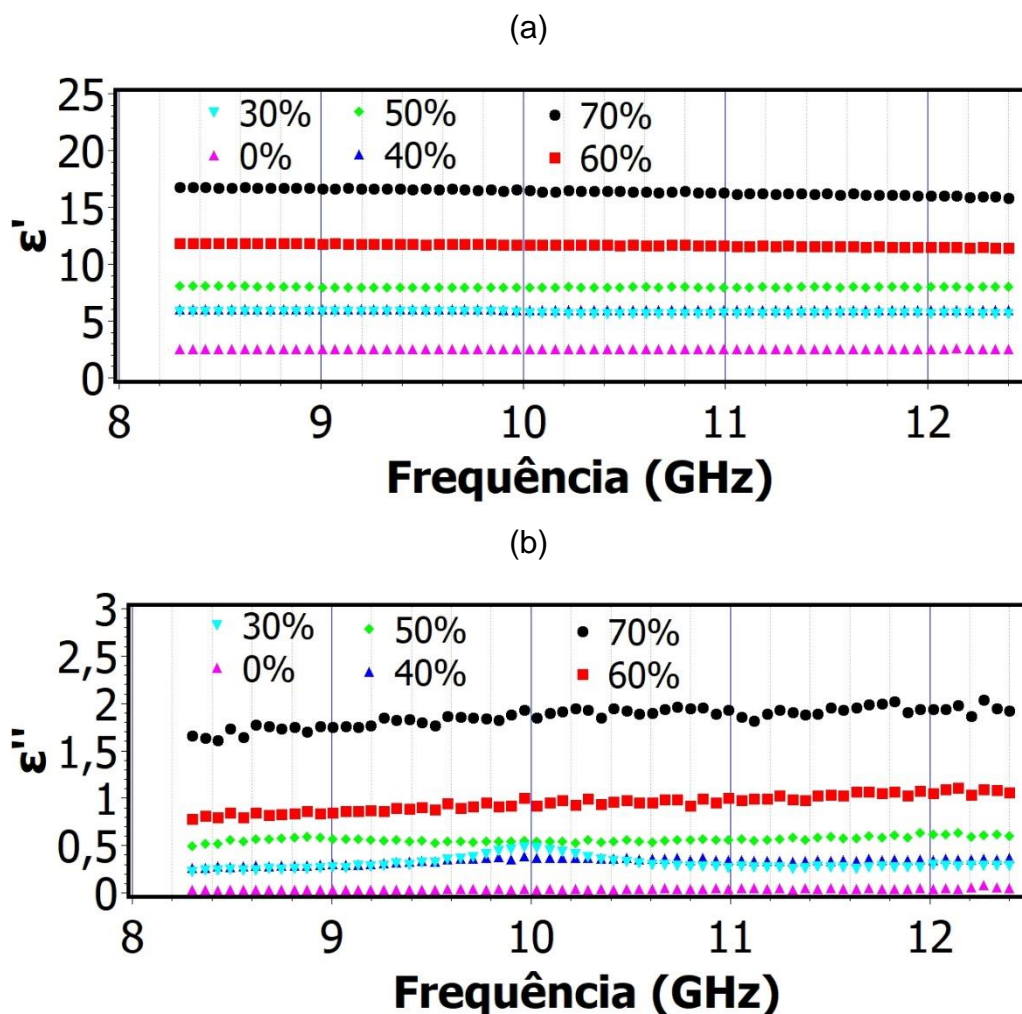
Figura 4.4 - Permissividades complexas das amostras de ferrita MnZn com 1,5 mm de espessura.



Parcelas (a) real e (b) imaginária da permeabilidade magnética.

Fonte: Produção do autor.

Figura 4.5 - Permissividades complexas das amostras de ferrita MnZn com 2,0 mm de espessura.



Parcelas (a) real e (b) imaginária da permeabilidade magnética.

Fonte: Produção do autor

O aumento da espessura demonstrou uma variação no potencial capacitivo, na qual os maiores valores médios de ϵ' foram de 17 e 24 referentes respectivamente as concentrações de 60% e 70% para as amostras de 1,5 mm. Contudo, para as amostras com 2,0 mm, e mesmas concentrações, os valores de ϵ' foram de 12 e 17 respectivamente para as concentrações de 60% e 70%.

A amostra com espessura de 1,5 mm e concentração de 50% de ferrita MnZn apresentou uma dispersão anômala no comportamento da permissividade. Este comportamento é característico ao fenômeno de ressonância. O ponto de

inflexão na curva de ϵ' e o pico na curva de ϵ'' sugere que este compósito possui uma ressonância em aproximadamente 9,2 GHz conforme o modelo de Lorentz já descrito neste trabalho no Tópico 2.9.1.

A Tabela 4.1 demonstra os valores médios da permissividade complexa ao longo da faixa de frequência analisada para ambas espessuras. É possível observar que em média, para a espessura de 1,5 mm, a parcela capacitiva apresentou valores maiores se comparado a espessura de 2,0 mm. A diferença em ϵ' é evidenciado mais expressivamente nas maiores concentrações. A variação no comportamento devido a espessura pode estar associada ao processamento das amostras, tendo em vista que em maiores concentrações de ferrita MnZn o material compósito apresentou maior viscosidade antes de sua cura. A alta viscosidade é um fator negativo na conformação do material no interior do molde, tornando mais difícil o preenchimento total interno da cavidade do molde com maior espessura (2,0 mm) (NORTHCUTT et al., 2018). Este fato pode resultar em uma menor homogeneização dos particulados na matriz do compósito e conseqüente redução na capacidade de interação com a radiação eletromagnética. Desta forma, o material apresentou menores valores em sua permissividade elétrica.

Tabela 4.1 - Valores médios das permissividades elétricas complexas das amostras de ferrita MnZn.

Concentração	1,5 mm		2,0 mm	
	ϵ' médio	ϵ'' médio	ϵ' médio	ϵ'' médio
0%	3,1	0	3	0
30%	6,2	0,3	6	0,3
40%	8,1	0,5	6	0,3
50%	8,2	0,7	8	0,5
60%	17	1,3	12,3	1
70%	24	2,5	17	1,7

Fonte: Produção do autor.

4.3.2 Permissividade elétrica das amostras de ferrocarbonila.

As permissividades elétricas das amostras de ferrocarbonila estão apresentadas a seguir nas Figuras 4.6 e 4.7. Os resultados revelam que o aumento da concentração de ferrocarbonila nos compósitos também resultou uma variação crescente em ϵ' , porém, de forma diferente em relação as amostras de ferrita MnZn.

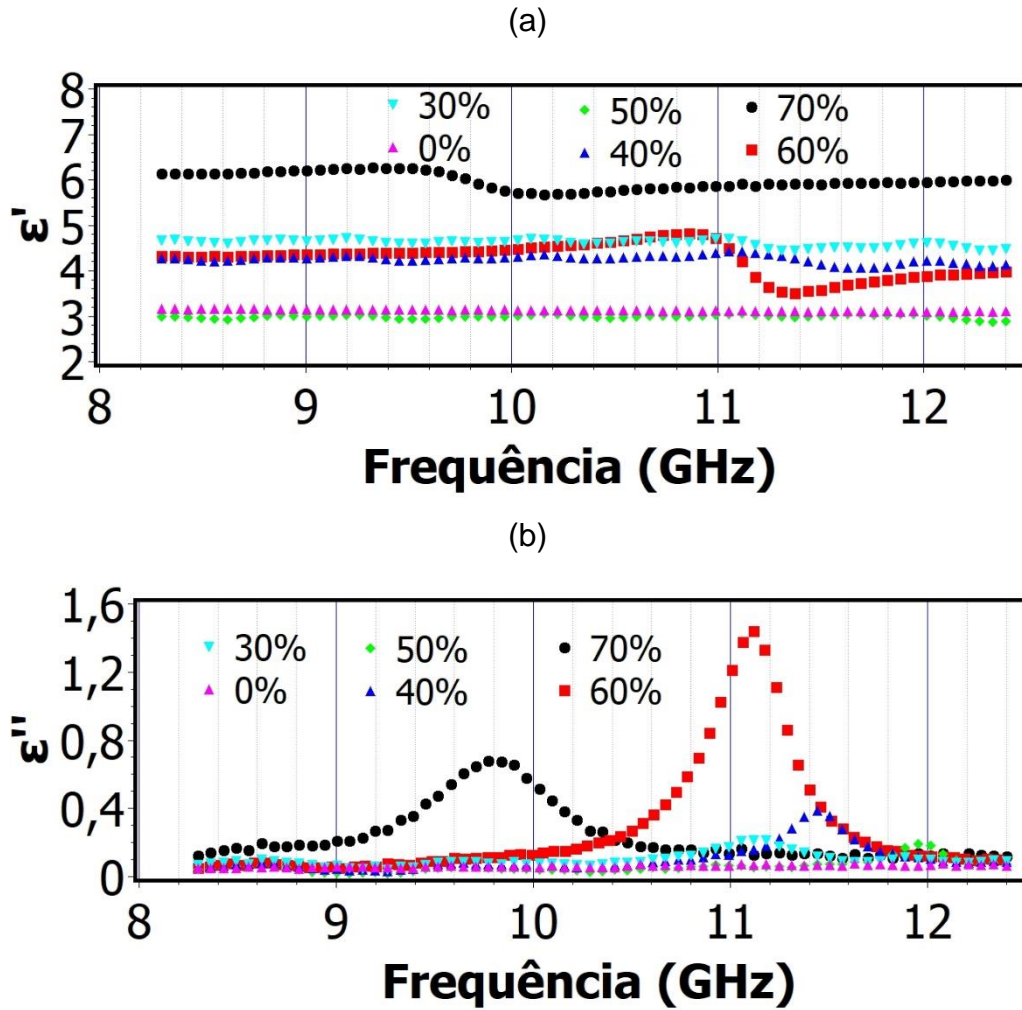
Para a espessura de 1,5 mm, o aumento de ϵ' demonstrou dois intervalos de dependência em relação as concentrações. As concentrações de 30%, 40%, 60% e 70% apresentaram um comportamento anômalo nas curvas de ϵ' e ϵ'' , ao longo da faixa de frequência analisada, alcançando o valor de 6,3 para ϵ' para concentração de 70% em 9,7 GHz. As concentrações de 0% e 50% não apresentaram tal comportamento, porém, apresentaram valores similares de 3,1 para ϵ' . O valor inferior de ϵ' da amostra de 50% pode estar associada ao fenômeno de ressonância, na qual após a frequência de ressonância a propriedade apresenta valores menores de ϵ' . Desta forma, considerando que todas as outras concentrações exibiram tal fenômeno ao longo da Banda X, é possível associar que a frequência de ressonância da amostra de 50% esteja em uma frequência menor que a faixa de frequência de análise deste trabalho. Por este fato, a amostra com 50% apresentou valor inferior ao longo da faixa de frequência estudada.

A variação nos valores de ϵ' demonstraram uma grande dependência em relação ao fenômeno de ressonância, podendo ter seu valor variado em considerável proporção. A exemplo, pode-se destacar o comportamento da amostra de 60% (1,5 mm), onde foi observado uma variação em ϵ' entre 5 e 3,2 no intervalo de 10,9 GHz a 11,4 GHz.

Para a espessura de 2,0 mm as curvas de ϵ' e ϵ'' não exibiram uma dependência com a dispersão anômala tanto quanto a espessura de 1,5 mm, alcançando valor constante de 7,8 em ϵ' para concentração de 70%, ao longo da faixa de frequência estudada. Contudo, é possível observar que a amostra de 60% (2,0 mm) na curva ϵ'' apresentou o comportamento de ressonância em

aproximadamente 9,5 GHz, resultando em uma variação entre o valor de 0,2 para 0,93 na parcela dissipativa.

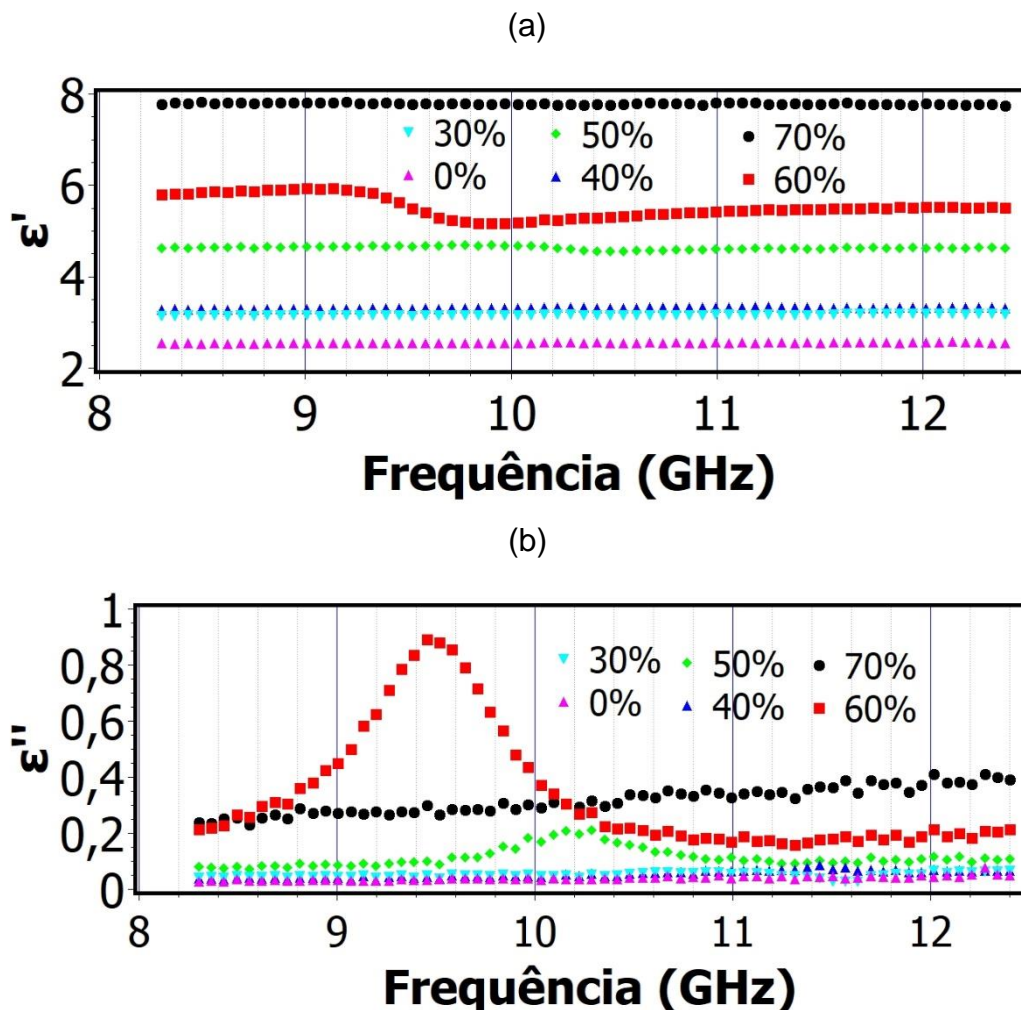
Figura 4.6 - Permissividades elétricas complexas das amostras de ferrocarbonila com 1,5 mm de espessura.



Parcelas (a) real e (b) imaginária da permeabilidade magnética.

Fonte: Produção do autor.

Figura 4.7 - Permissividades elétricas complexas das amostras de ferrocarbonila com 2,0 mm de espessura.



Parcelas (a) real e (b) imaginária da permissividade elétrica.

Fonte: Produção do autor.

A Tabela 4.2 demonstra os valores médios das permissividades complexas das amostras de ferrocarbonila. É possível observar uma pequena variação nos valores de ϵ' em relação ao aumento da espessura. A diferença nos valores da parcela real da permissividade é mais evidenciada na concentração de 70%, e pode estar associado a dependência do material compósito em relação ao fenômeno de ressonância. O modelo de Lorentz descrito na Equação 2.61 aponta que se a frequência de análise ω for maior que a frequência de ressonância ω_0 , o fator $(\omega_0^2 - \omega^2)$ contribui de forma negativa

ao valor de ϵ' (ORFANIDIS, 2008). E devido a isso, as permissividades das amostras com 1,5 mm podem estar reduzidas.

Os valores médios de ϵ'' não foram calculados na Tabela 4.2 devido a algumas amostras apresentarem picos ressonantes que proporcionam uma distorção do valor médio impossibilitando uma comparação. A variação da espessura de 1,5 mm para 2,0 mm resultou em um pequeno aumento na parcela capacitiva ϵ' a partir da concentração de 50% de ferrocarbonila. Este fenômeno pode estar associado ao caminho médio que a onda eletromagnética deve percorrer para atravessar o meio material, no caso 2,0 mm representa um caminho 33% maior que 1,5 mm. Um caminho maior, significa mais dipolos elétricos a serem orientados e conseqüentemente maior valor de ϵ' .

Tabela 4.2 - Valores médios das permissividades elétricas complexas das amostras de ferrocarbonila.

Concentração	1,5 mm		2,0 mm	
	ϵ' médio	ϵ'' médio	ϵ' médio	ϵ'' médio
0%	3,1	0	2,5	0
30%	4,2	-	3,5	0
40%	4,2	-	3,5	0
50%	3,1	-	4,6	-
60%	4,5	-	5,5	-
70%	6,1	-	7,8	0,3

Fonte: Produção do autor.

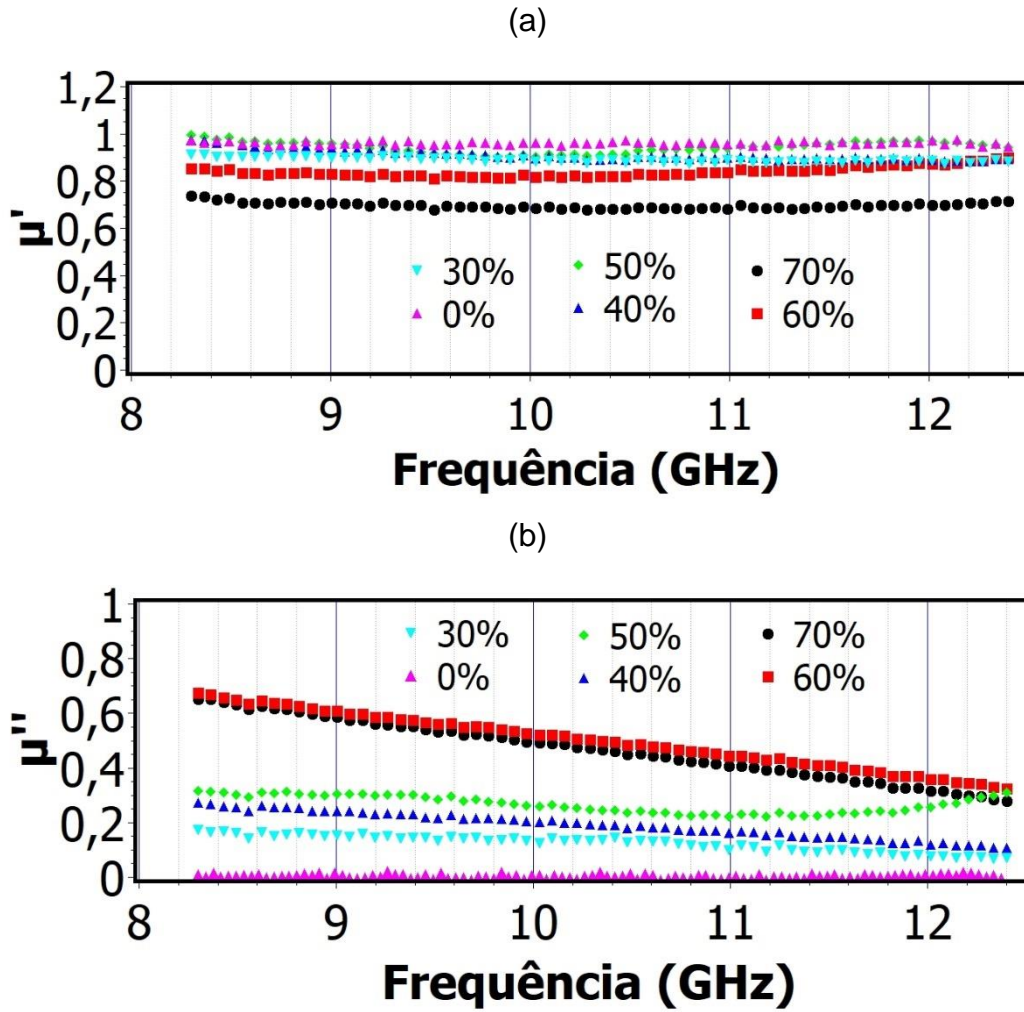
4.3.3 Permeabilidade magnética das amostras de ferrita MnZn.

As permeabilidades magnéticas complexas das amostras de ferrita MnZn estão demonstrados a seguir nas Figuras 4.8 e 4.9. Os resultados evidenciam que ocorreu variação negativa na parcela capacitiva das amostras principalmente nas concentrações de 60% e 70% em ambas espessuras. Este fato pode estar

associado a complexidade da estrutura cristalina da ferrita MnZn. O autor Feng e colaboradores (2007) descrevem em seu estudo que a parcela capacitiva da permeabilidade μ' depende gradualmente da mobilidade das paredes dos domínios magnéticos. Com isso, é importante considerar que quanto mais fácil a orientação dos domínios, maior será a parcela real da permeabilidade. Outro fator importante para o estudo da capacidade de magnetização é descrito por Ghasemi (2012) em seu trabalho. Onde o autor promove uma discussão sobre a relação entre a posição dos íons na estrutura cristalina e sua respectiva capacidade de orientação dos momentos magnéticos provenientes dos orbitais eletrônicos de cada íon. Com isso, considerando a discussão de ambos autores é possível sugerir que a posição de cada íon na estrutura cristalina promovem diferentes capacidades de orientações, conseqüentemente promovem diferentes graus de orientações das paredes dos domínios compostas por estes ions (FENG; QIU; SHEN, 2007; GHASEMI, 2012). Desta forma, é possível sugerir que estruturas cristalinas mais complexas podem apresentar maior dificuldade na orientação das paredes dos domínios magnéticos e conseqüente redução da capacidade de armazenamento de energia (FENG; QIU; SHEN, 2007; GHASEMI, 2012). Em paralelo, se estruturas mais complexas podem apresentar mais dificuldade de polarização, é esperado que sua polarização promova maior perda de energia. Este fenômeno pode justificar o fato de que as parcelas dissipativas de μ'' dos compósitos estudados apresentaram um aumento em relação a presença de ferrocarbonila.

Os valores de μ'' apresentaram uma leve redução em função do aumento da frequência. Este fato pode estar associado a dificuldade de dissipação em frequências maiores, no qual a magnetização é prejudicada com o aumento da frequência conforme descrito na Equação 2.65.

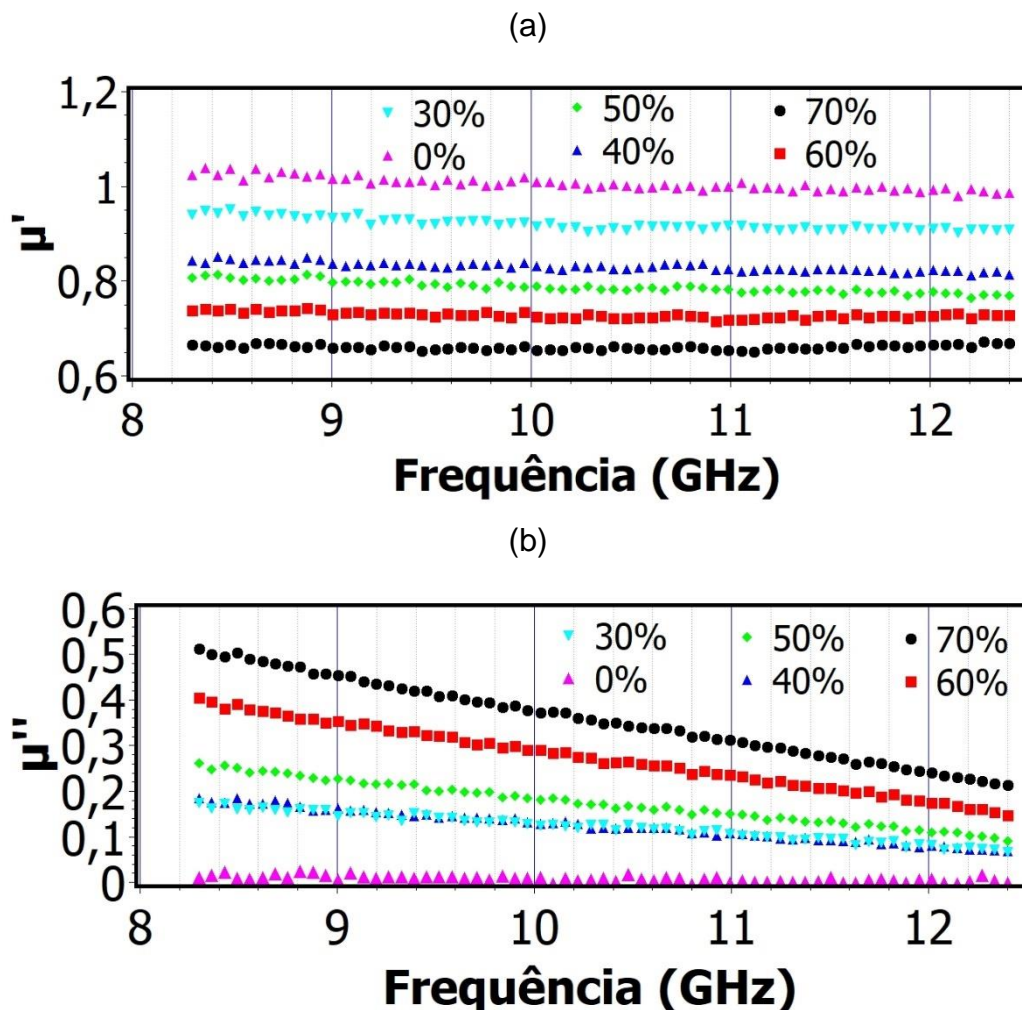
Figura 4.8 - Permeabilidade magnética complexa das amostras de ferrita MnZn com 1,5 mm de espessura.



Parcelas (a) real e (b) imaginária da permeabilidade magnética.

Fonte: Produção do autor.

Figura 4.9 - Permeabilidade complexas das amostras de ferrita MnZn com 2,0 mm de espessura.



Parcelas (a) real e (b) imaginária da permeabilidade magnética.

Fonte: Produção do autor.

A Tabela 4.3 apresenta os valores médios das permeabilidades magnéticas das amostras com ferrita MnZn em ambas espessuras. Os resultados demonstraram que a presença da ferrita MnZn na matriz de silicone reduziu a capacidade de magnetização. No entanto, aumentou de forma relativa à capacidade de dissipação da energia magnética. Este fato pode estar associado a distorção e orientação das paredes dos domínios magnéticos, que são alguns dos responsáveis pelo comportamento da permeabilidade (GAO; WU; QIU, 2018; LI et al., 2018a). A presença de ferrita MnZn revelou um aumento considerável na parcela de energia dissipada e geração de calor por efeito Joule durante a orientação dos domínios e isto pode ser um dos fatores de menor magnetização

μ' resultante. A variação da espessura de 1,5 mm para 2,0 mm não apresentou uma diferença relativamente considerável na permeabilidade magnética. Tanto a parcela capacitiva quanto a dissipativa apresentaram taxas de variações similares com o aumento da concentração de ferrita MnZn

Tabela 4.3 - Valores médios das permeabilidades magnéticas complexas das amostras de ferrita MnZn.

Concentração	1,5 mm		2,0 mm	
	μ' médio	μ'' médio	μ' médio	μ'' médio
0%	1	0	1	0
30%	0,9	0,2	0,92	0,18
40%	0,9	0,25	0,82	0,18
50%	0,9	0,28	0,8	0,23
60%	0,85	0,5	0,72	0,3
70%	0,7	0,5	0,68	0,4

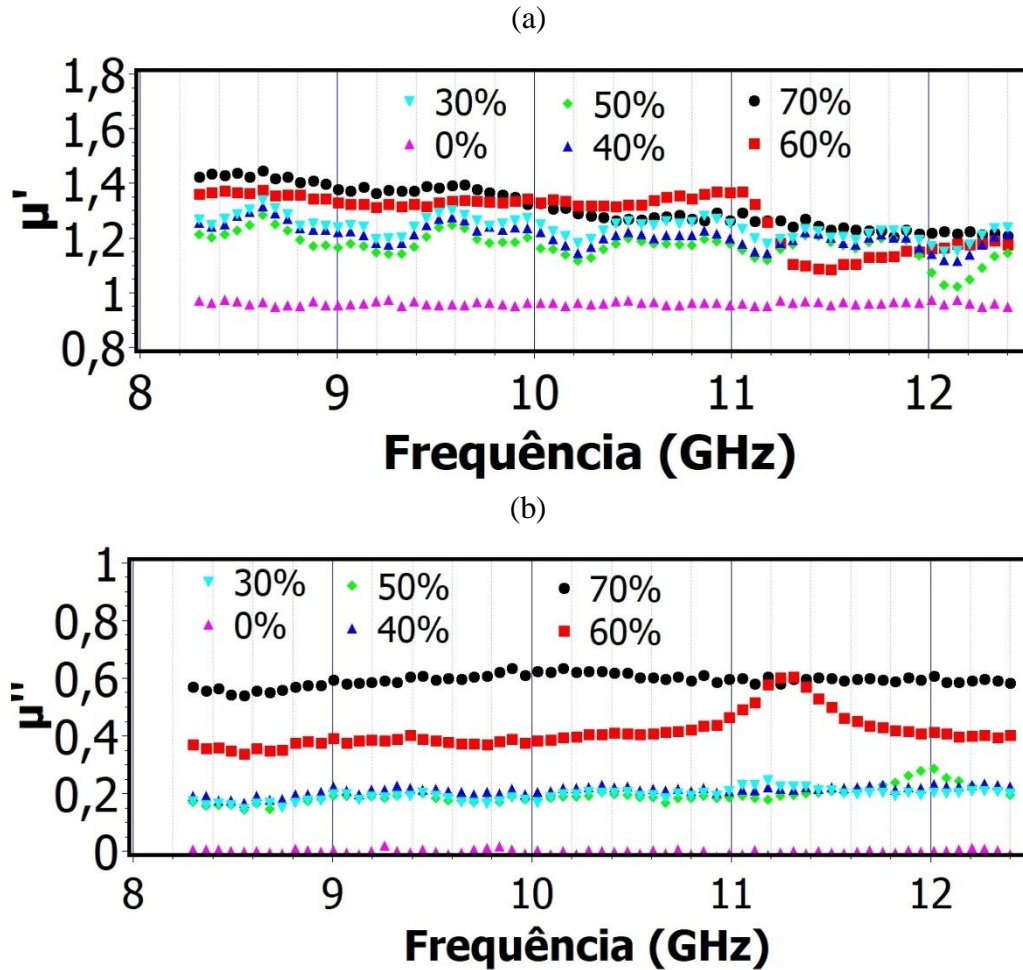
Fonte: Produção do autor.

4.3.4 Permeabilidade magnética das amostras de ferrocarbonila

As permeabilidades magnéticas complexas das amostras de ferrocarbonila estão apresentadas a seguir nas Figuras 4.10 e 4.11. Para ambas espessuras, o aumento da concentração de ferrocarbonila demonstrou um aumento em μ' e em μ'' . Os maiores valores médios de μ' foram 1,35 e 1,5 respectivamente para 1,5 mm e 2,0 mm. O aumento pode estar associado ao caráter magnético da ferrocarbonila, onde quanto maior sua concentração maior a possibilidade de magnetização (μ') e em paralelo maior a possibilidade de gerar atrito no fenômeno de orientação dos domínios magnéticos e com isso maior perda de energia (μ'') (GAO; WU; QIU, 2018). Esta contribuição foi mais expressiva para espessura de 2,0 mm no qual a parcela imaginária μ'' também exibiu uma

influência positiva em relação a presença da ferrocarbonila e alcançou valores médios de 0,6 e 0,8 respectivamente para 1,5 mm e 2,0 mm.

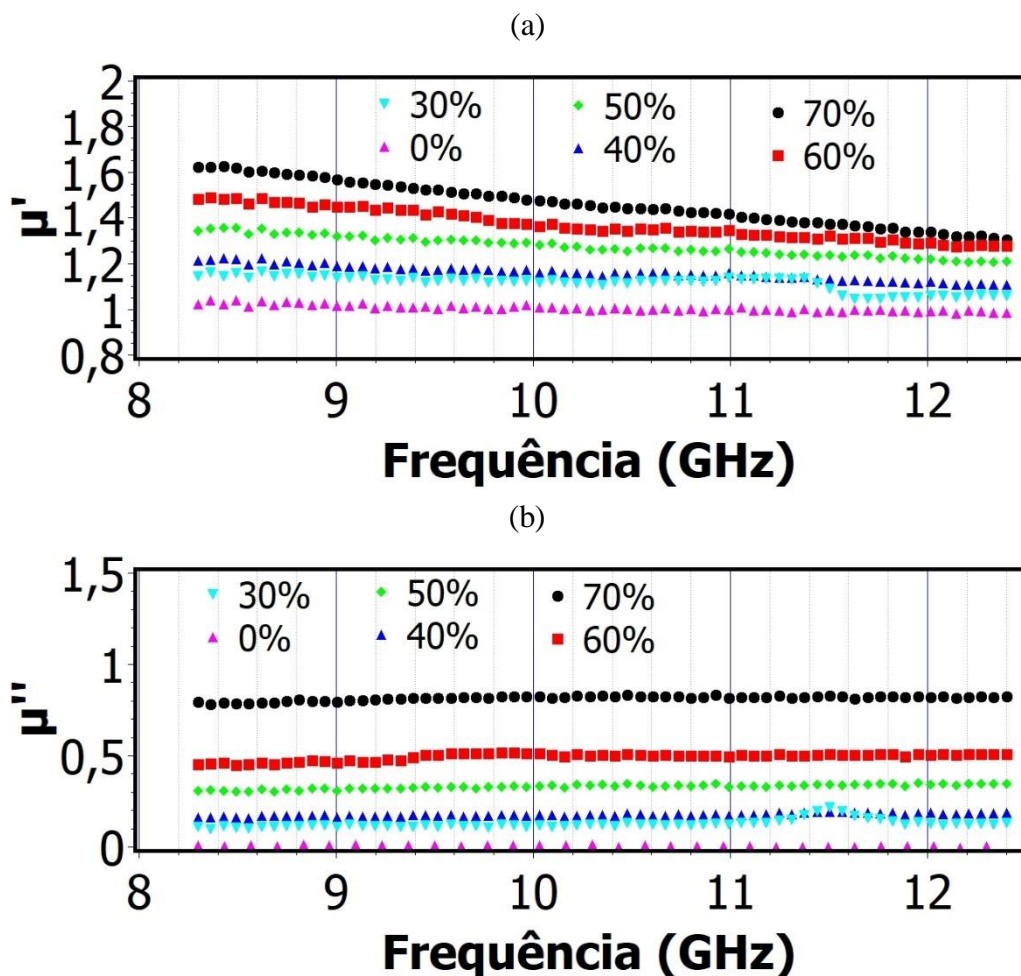
Figura 4.10 - Permeabilidade complexas das amostras de ferrocarbonila com 1,5 mm de espessura.



Parcelas (a) real e (b) imaginária da permeabilidade magnética.

Fonte: Produção do autor.

Figura 4.11 - Permeabilidade complexas das amostras de ferrocarbonila com 2,0 mm de espessura



Parcelas (a) real e (b) imaginária da permeabilidade magnética.

Fonte: Produção do autor.

A Tabela 4.4 apresenta os valores médios das permeabilidades magnéticas das amostras de ferrocarbonila. Os resultados revelam que as concentrações maiores, de 60% e 70%, proporcionam as maiores variações nas propriedades magnéticas. A variação da espessura de 1,5 mm para 2,0 mm não apresentou variação no comportamento das parcelas capacitivas e dissipativas da permeabilidade com o aumento da concentração de ferrocarbonila. Os valores de μ' e μ'' foram similares em relação as concentrações analisadas.

Tabela 4.4 - Valores médios das permeabilidades magnéticas complexas das amostras de ferrocarbonila.

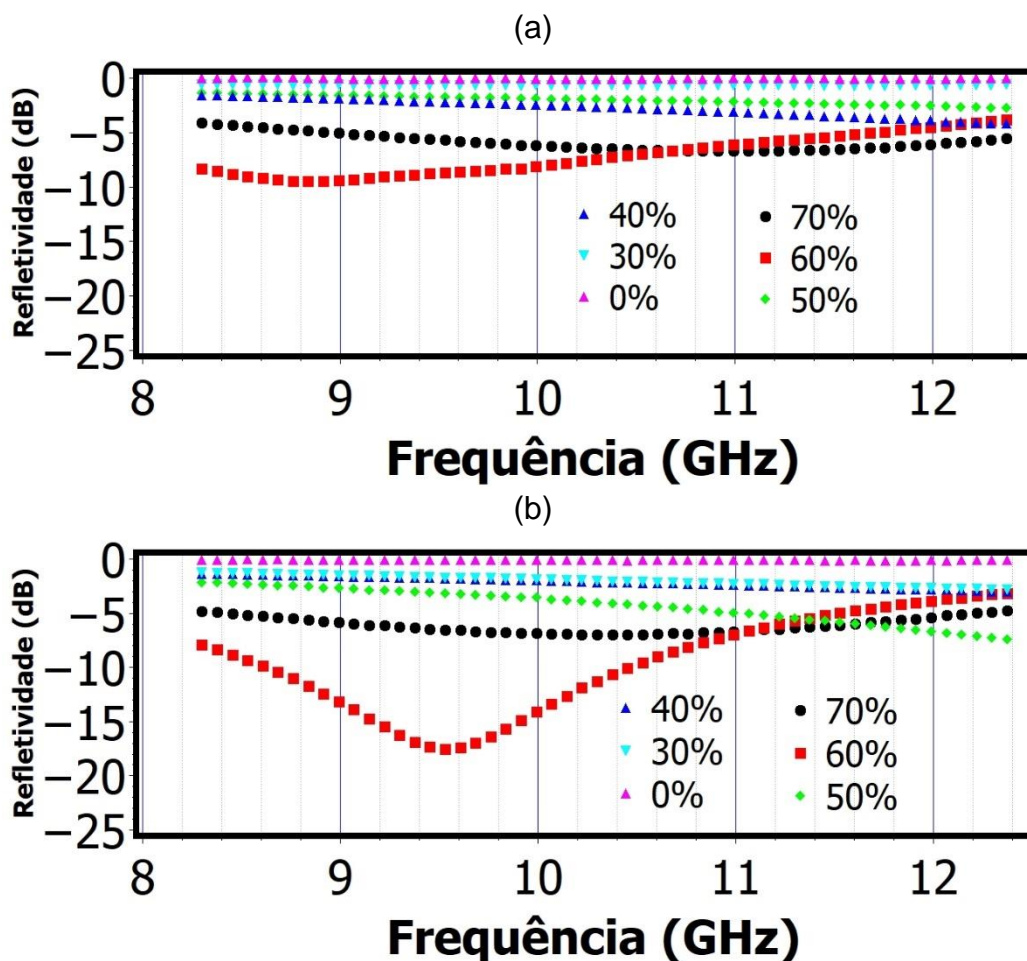
Concentração	1,5 mm		2,0 mm	
	μ' médio	μ'' médio	μ' médio	μ'' médio
0%	1	0	1	0
30%	1,2	0,2	1,1	0,18
40%	1,2	0,2	1,2	0,19
50%	1,2	0,2	1,3	0,3
60%	1,35	0,4	1,4	0,45
70%	1,35	0,6	1,5	0,8

Fonte: Produção do autor.

4.3.5 Refletividade

A Figura 4.12 exibe os valores referentes ao método de refletividade para as amostras de ferrita MnZn utilizando placa metálica atrás das amostras. Os resultados evidenciaram que as amostras de ferrita MnZn com baixas concentrações de 30%, 40%, 50% e 60%, possuem baixo potencial de absorção para ambas as espessuras. Contudo, as concentrações de 60% e 70% exibiram os valores mais significativos em relação a refletividade, alcançando valores de -9,8 dB (\approx 89,5% de absorção) em 8,8 GHz e -6 dB (\approx 74,9% de absorção) em 11,4 GHz respectivamente para 60% e 70%, com espessuras de 1,5 mm. As amostras com concentrações de 60% e 70%, com espessura de 2,0 mm, apresentaram valores de -17 dB (\approx 98%) em 9,5 GHz e -7 dB (\approx 80%) em 10,5 GHz, respectivamente.

Figura 4.12 - Refletividades das amostras de ferrita MnZn.



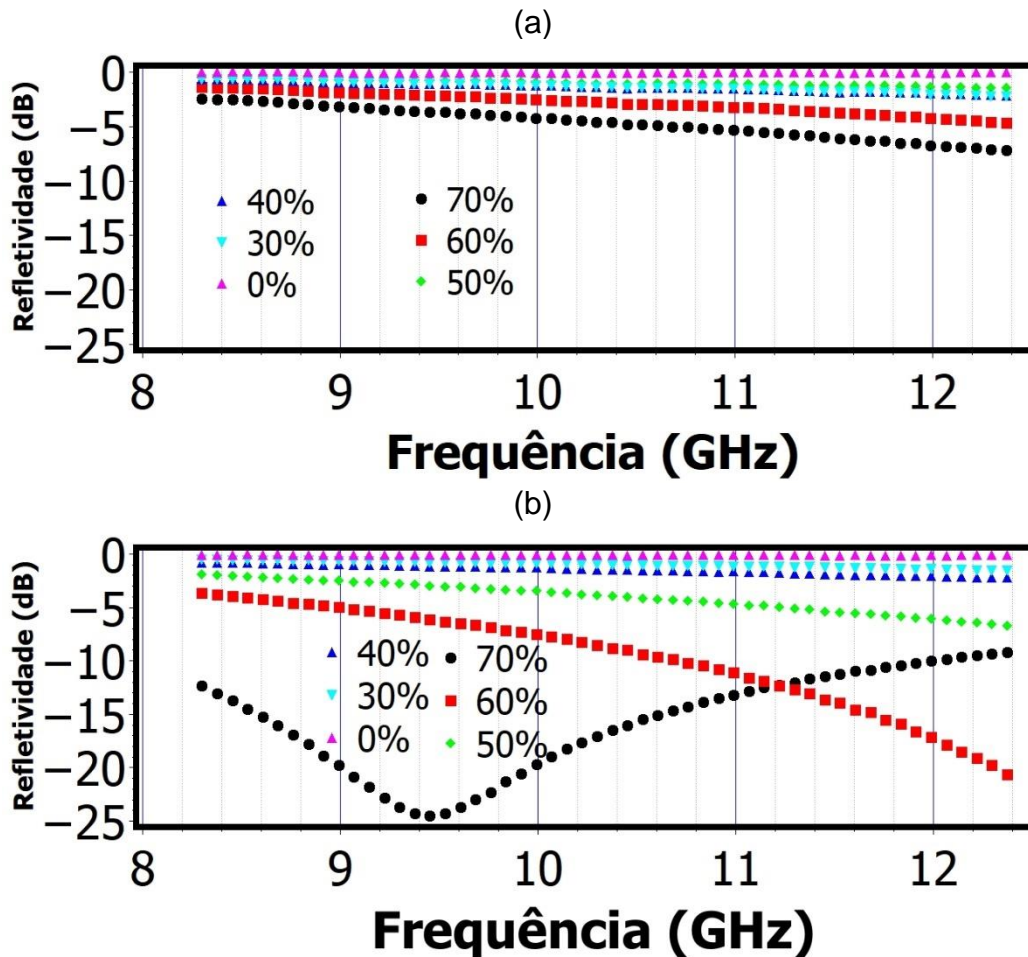
Amostras com (a) 1,5 mm e (b) 2,0 mm de espessura.

Fonte: Produção do autor.

A Figura 4.13 apresenta os valores referentes ao método de refletividade das amostras de ferrocarbonila. Os resultados evidenciam que para espessura de 1,5 mm, as amostras manifestaram um aumento linear em função do aumento da concentração e da frequência. O valor de refletividade apresentado variou entre -0,6 dB ($\approx 6,7\%$ de absorção) e -7,2 dB ($\approx 80,9\%$ de absorção), referentes as concentrações de 30% a 70%, em 12,4 GHz. A variação negativa no valor de refletividade com o aumento da frequência sugere maiores valores de atenuação para faixas de frequências maiores à Banda X. Para as amostras com 2,0 mm este padrão não se repete. Os resultados apontam um aumento na taxa da variação a partir de 40 % de ferrocarbonila. É possível observar a presença de um pico de absorção em 9,5 GHz alcançando uma atenuação de

aproximadamente -24,8 dB ($\approx 99,6\%$ de absorção) para concentração de 70%. E um aparente início de pico de absorção com valor em torno de -22,5 dB ($\approx 99,4\%$ de absorção) para 60% no limite superior da faixa de frequência.

Figura 4.13 - Refletividades das amostras de ferrocarbonila.



Amostras com (a) 1,5 mm e (b) 2,0 mm de espessura.

Fonte: Produção do autor.

As presenças dos picos de absorção, nas Figuras 4.12 e 4.13, podem ser discutidas conforme as Equações 2.73 e 2.74. A equação demonstra que o pico de absorção depende da impedância do meio material η_{in} no numerador do argumento da função logarítmica. Desta forma, a razão $|(\eta_{in} - 1)/(\eta_{in} + 1)|$ tende a valores próximos de zero quando $\eta_{in} \approx 1$, e a refletividade apresenta altos valores negativos (em dB), ou seja, maiores potenciais de absorção. Em paralelo, a Equação 2.74 sugere que deve ocorrer uma combinação de valores

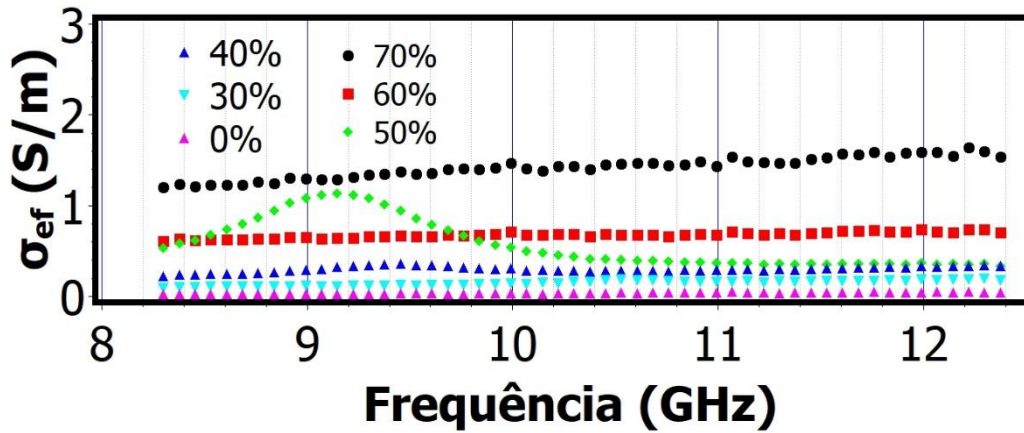
entre os parâmetros ϵ_r , μ_r , t e f para que η_{in} seja um valor próximo de 1 (XU et al., 2018). Conforme as propriedades ϵ_r e μ_r apresentaram variações devido ao aumento das concentrações, necessariamente deve ocorrer variações nos fatores f e t dos picos de absorção. Com isso, os resultados indicam que em uma determinada espessura t , o controle dos valores de ϵ_r e μ_r devido a variação das concentrações permite o controle em relação a qual frequência f pode ocorrer o pico de absorção. Este conceito simboliza um parâmetro muito importante nas aplicações eletromagnéticas como: filtros eletromagnéticos, blindagem eletromagnética, transmissores e receptores de dados. Pois, através de uma manipulação simples da composição da estrutura (variação da concentração) foi possível obter ou evitar a atenuação da radiação ao longo da Banda X, deslocando a frequência onde ocorrem os picos.

4.3.6 Condutividade

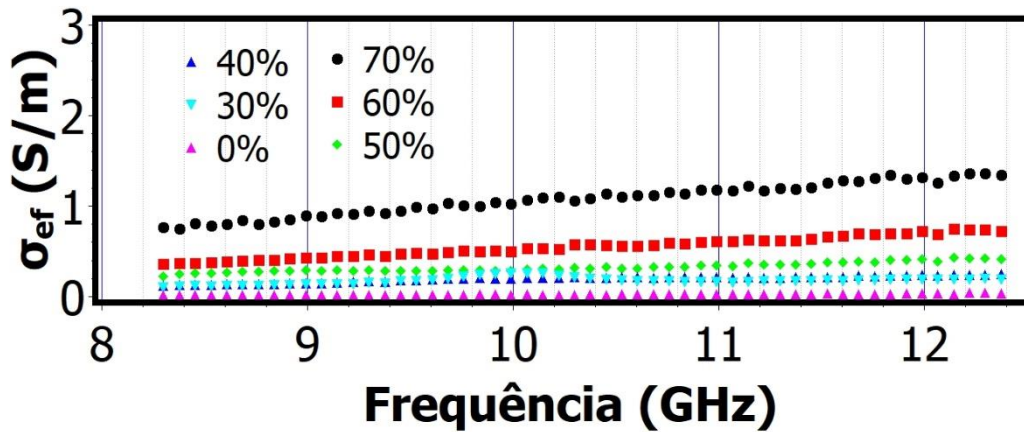
As Figuras 4.14 e 4.15 apresentam respectivamente a condutividade efetiva das amostras de ferrita MnZn e ferrocarbonila calculadas a partir da relação da Equação 2.66. Os resultados da Figura 4.14 revelam que o aumento da concentração de ferrita MnZn resultou em maior capacidade de dissipação da energia devido ao aumento da condutividade em ambas espessuras. Para as amostras com 1,5 mm é interessante observar que ocorreu uma descontinuidade na condutividade da amostra com 50% em aproximadamente 9,2 GHz (ressonância de ϵ'') e resultou em uma condutividade maior que a amostra de 60% nesta frequência. Este comportamento não ocorre para amostra de 2,0 mm. Com isso, a espessura exibiu ser um importante fator na presença da descontinuidade devido ao fenômeno de ressonância como descrito pelo modelo de Lorentz.

Figura 4.14 - Condutividades efetivas das amostras de ferrita MnZn

(a)



(b)



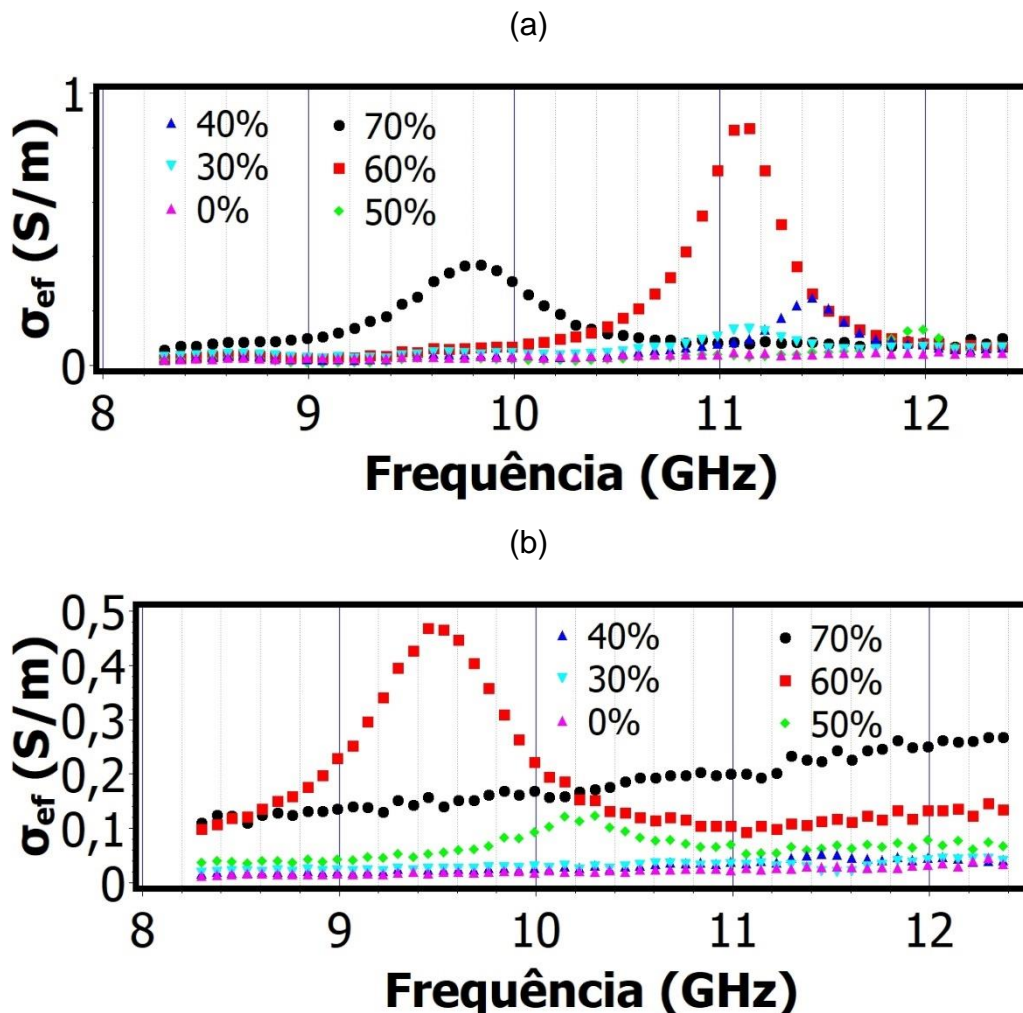
Condutividades efetivas referente as espessuras de (a) 1,5 mm e (b) 2,0 mm.

Fonte: Produção do autor.

Os resultados da Figura 4.15 revelam que a presença da ferrocarbonila não resultou em um considerável aumento da condutividade efetiva do compósito em ambas espessuras. Contudo, é importante destacar a presença de alguns picos nos valores da condutividade efetiva ao longo da faixa de frequências em determinadas amostras. Para espessura de 1,5 mm e concentrações de 60% e 70%, houve a presença de picos em 11,1 GHz e 9,8 GHz, respectivamente. O aumento da condutividade nestas frequências resultou em redução da impedância do meio material, como descrito pela Equação 2.28. A variação na impedância em determinadas frequências altera o comportamento

eletromagnético linear do material e pode resultar em picos de absorção evidenciados no método de refletividade conforme a relação matemática da Equação 2.73, discutido no tópico anterior.

Figura 4.15 - Condutividades efetivas das amostras de ferrocarbonila.



Condutividades efetivas referente as espessuras de (a) 1,5 mm e (b) 2,0 mm.

Fonte: Produção do autor.

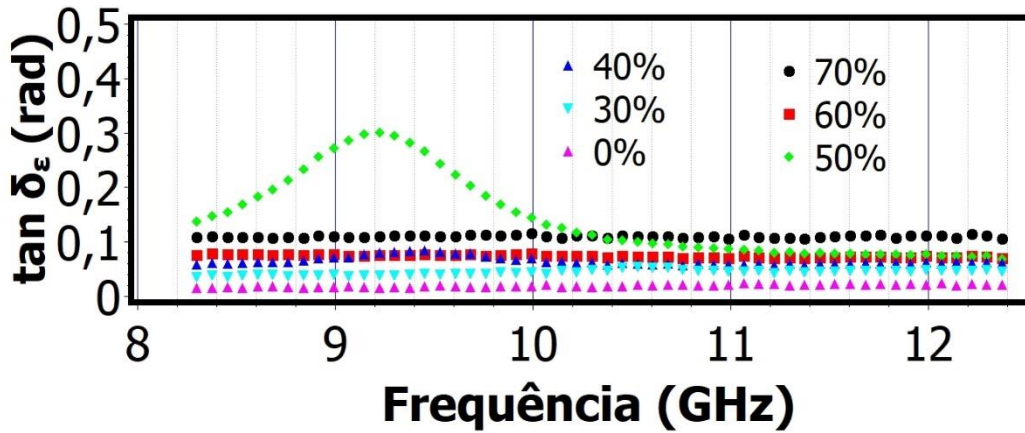
A presença de picos nas condutividades apresentados nas Figuras 4.14 e 4.15 podem ser discutidos conforme a descrição matemática da Equação 2.67. Os picos de condutividade com aumento de intensidade podem estar associados a uma maior população de elétrons n que conseguem responder ao campo externo \vec{E}_{ext} para a frequência específica do pico.

4.3.7 Tangente de perda elétrica e tangente de perda magnética

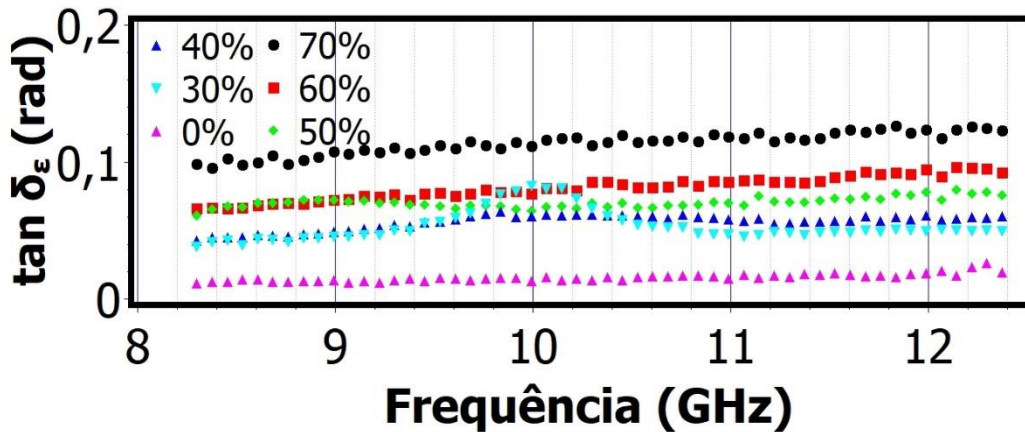
A análise do comportamento do material em relação a sua capacidade de resposta a uma excitação elétrica ou magnética pode ser feita através dos fatores de tangentes de perdas elétrica $\tan \delta_\epsilon$ ou magnética $\tan \delta_\mu$, calculados conforme as Equações 2.68 e 2.69. E com isso, é possível observar qual dos dois fatores sofrem a maior influência com a variação da concentração dos particulados magnéticos. A Figura 4.16 exibe as curvas de tangente de perda elétrica para as amostras de ferrita MnZn com 1,5 mm e 2,0 mm de espessura. Os resultados demonstraram que o aumento da concentração não resultou em considerável variação nos valores de $\tan \delta_\epsilon$, para ambas espessuras. Os valores médios de $\tan \delta_\epsilon$ ficaram em torno de 0 referente a 0%, e 0,1 rad ($\delta_\epsilon \approx 5,73^\circ$) em relação as maiores concentrações em ambas espessuras. Entretanto, a amostra com 50% e espessura de 1,5 mm (que demonstrou descontinuidade no comportamento de ϵ'') resultou em um aumento da $\tan \delta_\epsilon$ na mesma frequência. Este aumento demonstrou uma variação no potencial elétrico dissipativo, alcançando o valor próximo a 0,3 rad ($\delta_\epsilon \approx 17,20^\circ$) para $\tan \delta_\epsilon$ em 9,2 GHz, porém, este valor não foi suficiente para alterar o caráter capacitivo do meio material, ou seja foi menor que 45° .

Figura 4.16 - Tangentes de perdas elétricas das amostras de ferrita MnZn.

(a)



(b)



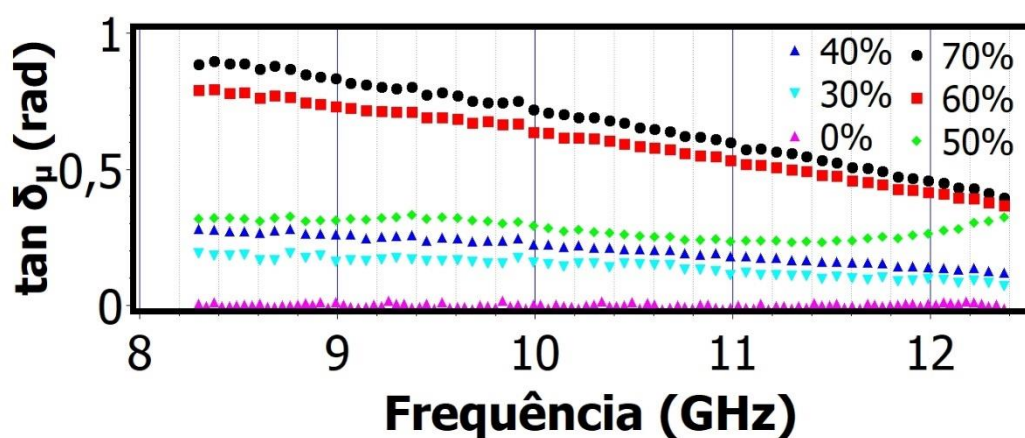
Tangentes de perdas elétricas referentes as espessuras de (a) 1,5 mm e (b) 2,0 mm.

Fonte: Produção do Autor.

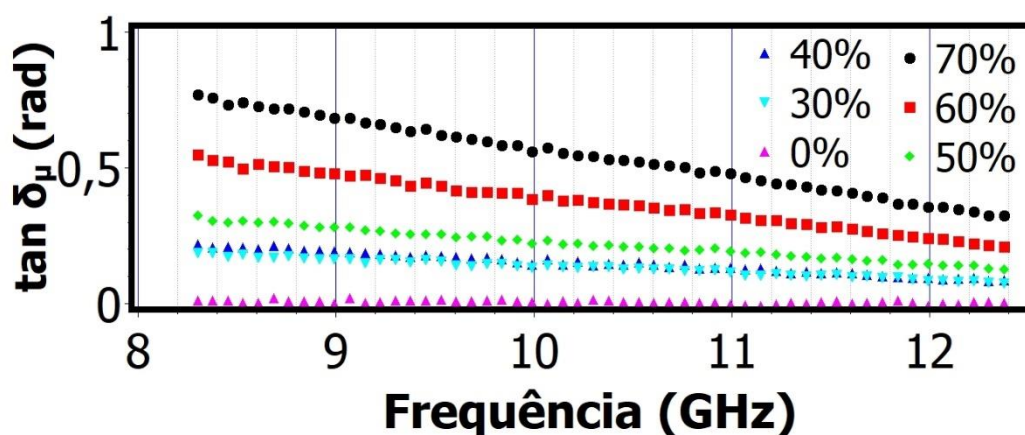
A Figura 4.17 exibe as curvas de tangente de perda magnética para as amostras de ferrita MnZn com 1,5 mm e 2,0 mm de espessura. Os resultados demonstram que as maiores concentrações possuem uma influência positiva na dissipação de energia magnética do compósito, para ambas espessuras. As concentrações de 60% e 70% e 1,5 mm alcançaram respectivamente valores próximos a 0,8 rad ($\delta_\mu \approx 45,86^\circ$) e 0,9 rad ($\delta_\mu \approx 51,59^\circ$) entre 8,2 GHz e 8,7 GHz. A amostra com 70% e espessura de 2,0 mm alcançou um valor próximo de 0,7 rad ($\delta_\mu \approx 40,13^\circ$) também no começo da banda.

Figura 4.17 - Tangentes de perdas magnéticas das amostras de ferrita MnZn.

(a)



(b)



Tangentes de perdas magnéticas referentes às espessuras de (a) 1,5 mm e (b) 2,0 mm.
Fonte: Produção do autor.

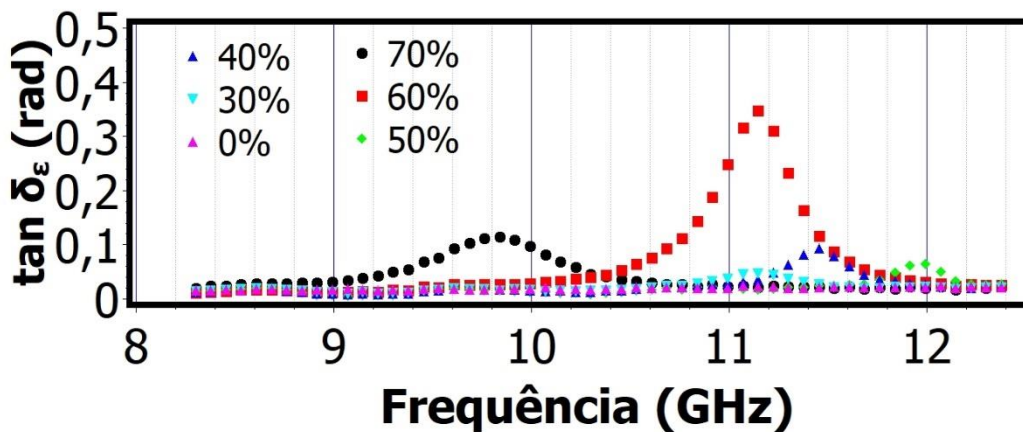
A relação das tangentes de perdas e a capacidade de dissipação da energia armazenada por um material é descrito pela literatura com base no valor de aproximadamente 0,785 rad ($\delta = 45^\circ$). Com isso, é possível observar que os compósitos a base de ferrita MnZn e concentração de 60% para 1,5 mm e 70% com 2,0 mm, foram capazes de gerar uma variação na capacidade de dissipação predominante devido ao caráter magnético ($\tan \delta_\mu$).

A Figura 4.18 apresenta as tangentes de perdas elétricas das amostras de ferrocarbonila. Os resultados apontam que a presença de ferrocarbonila na matriz dielétrica, em ambas espessuras, não resultou em alterações

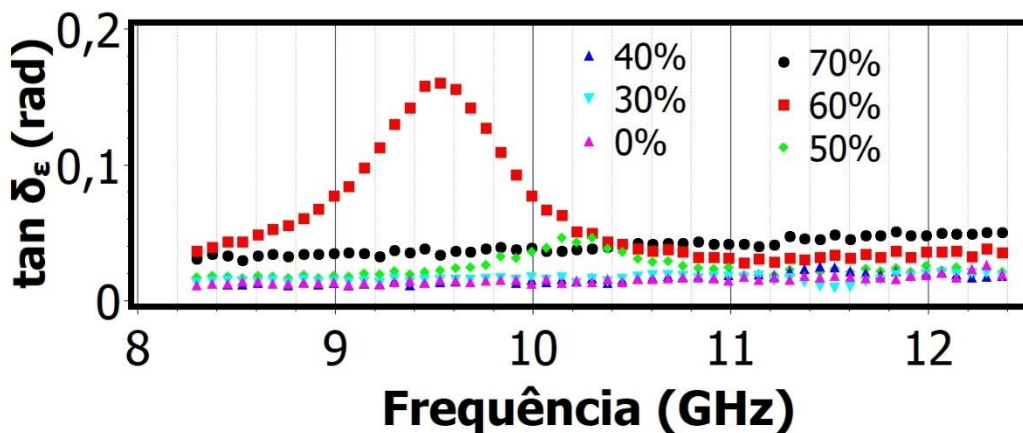
consideráveis em relação a amostra de silicone puro (0%), com valores próximos a 0,05 ($\delta_\epsilon \approx 2,86^\circ$). Entretanto, a variação de ϵ'' em função do fenômeno de ressonância discutido no tópico 4.3.2 deste trabalho, resultou em um aumento do caráter dissipativo do meio material, evidenciado nas amostras de 60% e 70% e 1,5 mm de espessura, e a amostra com 60% e 2,0 mm de espessura. As amostras com 60% e 70% e espessura de 1,5 mm apresentaram picos em 11,3 GHz e 9,8 GHz e valores próximos a 0,35 ($\delta_\epsilon \approx 20,06^\circ$) e 0,1 ($\delta_\epsilon \approx 5,76^\circ$), respectivamente. A amostra com 60% e 2,0 mm de espessura, apresentou pico em 9,5 GHz alcançando valor próximo de 0,18 ($\delta_\epsilon \approx 10,32^\circ$).

Figura 4.18 - Tangentes de perda elétrica das amostras de ferrocarbonila.

(a)



(b)

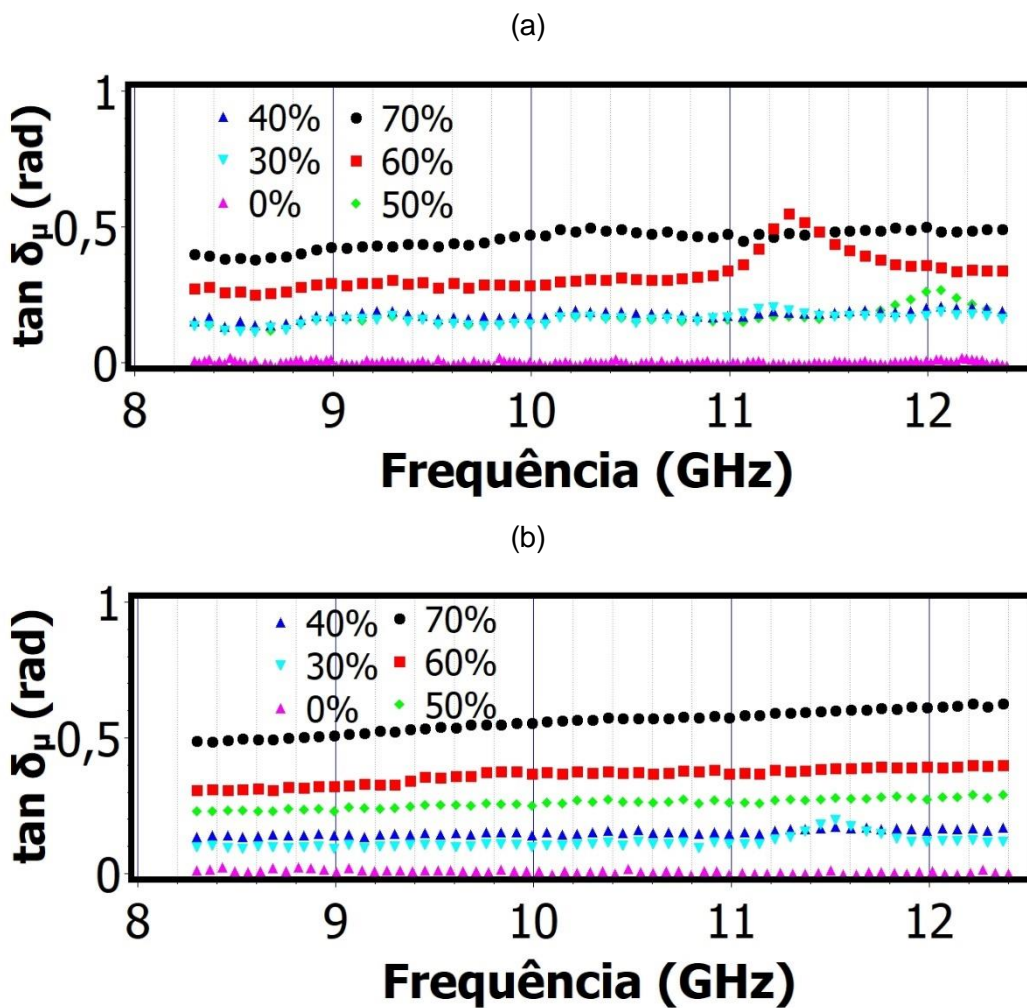


Tangente de perda elétrica referentes as espessuras de (a) 1,5 mm e (b) 2,0 mm.

Fonte: Produção do autor.

A Figura 4.19 apresenta as tangentes de perda magnética das amostras de ferrocarbonila. Os resultados demonstram que a presença de ferrocarbonila resultou em aumento do fator de perda magnética em ambas espessuras. O aumento da concentração de ferrocarbonila gerou um aumento nos valores de $Tan \delta_{\mu}$, variando de 0 (0%) a valores médios de 0,4 ($\delta_{\mu} \approx 22,93^{\circ}$), e 0,5 ($\delta_{\mu} \approx 26,66^{\circ}$), respectivamente para concentração de 70% com 1,5 mm e 2,0 mm de espessuras.

Figura 4.19 - Tangentes de perda magnética das amostras de ferrocarbonila.



Tangentes de perda magnética referentes as espessuras de (a) 1,5 mm e (b) 2,0 mm.

Fonte: Produção do autor.

A Tabela 4.5 apresenta os maiores valores de tangentes de perdas para cada material em cada espessura. Os resultados da tabela demonstram que as maiores concentrações (60% e 70%), proporcionaram as maiores capacidades de dissipações na matriz polimérica. É importante destacar que os valores referentes as amostras de 60% que foram superiores as amostras de 70% em alguns materiais, ocorreram devido à presença da descontinuidade resultante do fenômeno de ressonância. Com isso, é possível destacar que a presença do comportamento de ressonância pode alterar consideravelmente as propriedades (ϵ_r e μ_r) e os fatores de perdas em determinadas frequências. Esta análise permite apontar que o fenômeno de ressonância é um dos parâmetros que deve ser considerado na caracterização das propriedades eletromagnéticas.

Tabela 4.5 - Maiores valores de tangentes de perdas de cada material em cada espessura e as respectivas concentrações.

	Ferrita MnZn 1,5 mm	Ferrita MnZn 2,0 mm	Ferrocarbonila 1,5 mm	Ferrocarbonila 2,0 mm
$\tan \delta_\epsilon$ (rad)	0,3 e 60%	0,1 e 70%	0,35 e 60%	0,18 e 60%
$\tan \delta_\mu$ (rad)	0,9 e 70%	0,8 e 70%	0,42 e 60%	0,5 e 70%

Fonte: Produção do autor.

5 CONCLUSÃO

Primeiramente foi estabelecido a condição de limite para as concentrações na etapa de processamento das amostras de Ferrita MnZn e ferrocarbonila em matriz de silicone. A concentração de 70% em peso de ambos particulados foi escolhida como concentração limite por apresentar uma visível saturação do silicone em relação aos particulados.

A proporção de 5% em peso do agente catalisador no silicone mostrou-se a mais adequada para permitir o processo de dispersão aleatória com cura em quinze minutos sem precipitação do particulado. Embora sem prejuízo para o processo de dispersão aleatória, a aumento da concentração de particulado no silicone aumentou a viscosidade do compósito exigindo uma maior atenção no processo de mistura.

Um aumento na permissividade elétrica em função do aumento da concentração dos particulados de ferrita MnZn e ferrocarbonila foi associado a um aumento na frequência de plasma relativas devido ao possível aumento no número de dipolos elétricos no interior do material.

A diferença no comportamento da parcela real da permeabilidade magnética para diferentes concentrações de ferrita MnZn e ferrocarbonila foi relacionada à diferença na complexidade da estrutura cristalina entre ambos particulados. Este resultado sugere que a capacidade de armazenar energia por fenômenos magnéticos pode ser dependente da capacidade de orientação dos domínios magnéticos de cada material.

No ensaio da refletividade, a amostra que apresentou o melhor desempenho no fenômeno de absorção foi a amostra com 70% de ferrocarbonila e espessura de 2,0 mm, alcançando o valor de 24,8 dB, ou seja, aproximadamente 99,6% de absorção em 9,6 GHz. Entre as amostras a base de ferrita MnZn, o maior valor de absorção ocorreu na amostra com concentração 60% MnZn e espessura de 2,0 mm, alcançando o valor de -17 dB, ou seja, aproximadamente 98% de absorção em 9,5 GHz. Também em relação ao ensaio de refletividade, o pico de absorção apresentou dependência em relação aos valores de permissividade (ϵ)

e permeabilidade (μ), e também dependência em relação a espessura da amostra (t) e da frequência (f). Os resultados deste trabalho indicaram que a permissividade e permeabilidade dependem da concentração de cada tipo de particulado disperso na matriz de silicone. Com isso, o pico de absorção apresentou uma dependência de maneira indireta em relação a concentração dos particulados.

A condutividade elétrica mostrou que os compósitos gerados, no intervalo de frequência e concentrações utilizados, apresentam valores referentes aos materiais considerados semicondutores.

Em ambos materiais particulados, a predominância dos efeitos magnéticos sobre os efeitos elétricos na capacidade de absorção foi evidenciada na comparação entre os valores das tangentes de perdas magnéticas e elétricas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMARAL JUNIOR, M. A. **Obtenção e caracterização de compósitos carbono ativada aplicados a materiais eletromagnética na faixa de frequência de 8,2 A 12,4 GHz (Banda X)**. 2018. 207 p. Tese (Doutorado em Engenharia e Tecnologias Espaciais) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2018.
- BAI, L.; ZHU, L.; ZHANG, X.; ZHANG, W.; YU, Q. Multi-satellite relay transmission in 5G: concepts, techniques, and challenges. **IEEE Network**, v. 32, n. 5, p. 38–44, 2018.
- BAI, Y.; MA, W.; LIU, Y.; LIU, Y.; XUE, J.; XU, K.; LIU, Y.; ZHAO, G. Preparation of graphene-carbonyl iron powder@tri-iron tetroxide composite and its better microwave absorption properties. **Journal of Materials Science: Materials in Electronics**, v. 30, n. 6, p. 5454–5463, 2019.
- BAKER-JARVIS, J.; VANZURA, E. J.; KISSICK, W. A. Improved technique for determining complex permittivity with the transmission/reflection method. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, v. 38, n. 8, p. 1096–1103, 1990.
- BALANIS, C. A. **Advanced engineering electromagnetics**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1938. 981 p.
- BEGUM, H. A.; KHATUN, N.; ISLAM, S.; AHMED, N. A.; HOSSAIN, M. S.; GAFUR, M. A.; SIDDIKA, A. Synthesis and characterization of structural, magnetic and electrical properties of Ni–Mn–Zn ferrites. **International Journal of Nanoelectronics and Materials**, v. 11, n. 1, p. 15–24, 2018.
- BEZERRA, M. J. O. S. **Síntese e caracterização da ferrita de MnZn obtida pelo método dos citratos precursores**. 2007. 114 p. Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade Federal do Rio grande do Norte, Natal, 2007.
- BIRD, J. **Circuitos elétricos**. 3.ed. Rio de Janeiro: [s.n.],2009. 572 p.
- BYCHANOK, D.; LI, S.; SANCHEZ-SANCHEZ, A.; GOROKHOV, G.; KUZHIR, P.; OGRIN, F. Y.; PASC, A.; BALLWEG, T.; MANDEL, K.; SZCZUREK, A.; FIERRO, V.; CELZARD, A. Hollow carbon spheres in microwaves: bio inspired absorbing coating. **Applied Physics Letters**, v. 108, n. 1, 2016.
- CALLISTER, W. D. **Materials science and engineering: an introduction**. 9. ed. [S.l.: s.n.], 2013. 59 p. ISBN 978-1-118-32457-8.
- CANEVAROLO JUNIOR, S. V. **Ciência dos polímeros**. 2. ed. São Paulo: [s.n.], 2010. 277 p.

CAO, M. S.; CAI, Y. Z.; HE, P.; SHU, J. C.; CAO, W. Q.; YUAN, J. 2D MXenes: electromagnetic property for microwave absorption and electromagnetic interference shielding. **Chemical Engineering Journal**, v. 359, p. 1265–1302, 2019.

CARTER, C. B.; NORTON, M. G. **Ceramic materials**. New York, NY: Springer, 2013. ISBN 978-1-4614-3522-8.

CINIBULK, M. K. Hexaluminates as a cleavable fiber–matrix interphase: synthesis, texture development, and phase compatibility. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 20, n. 5, p. 569–582, maio 2000.

DEDAVID, B. A.; GOMES, C. I.; MACHADO, G. **Microscopia eletrônica de varredura**. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007. 60 p.

DELFINI, A.; ALBANO, M.; VRICELLA, A.; SANTONI, F.; RUBINI, G.; PASTORE, R.; MARCHETTI, M. Advanced radar absorbing ceramic-based materials for multifunctional applications in space environment. **Materials**, v. 11, n. 9, p. 1730, 2018.

DEO, N. High performance transmitters for small satellites for data transmission and remote sensing. **IEEE Aerospace Conference Proceedings**, v. 2019, p. 1–6, 2019.

DRAKAKIS, E.; KYMAKIS, E.; TZAGKARAKIS, G.; LOULOUDAKIS, D.; KATHARAKIS, M.; KENANAKIS, G.; SUCHEA, M.; TUDOSE, V.; KOUDOUMAS, E. A study of the electromagnetic shielding mechanisms in the GHz frequency range of graphene based composite layers. **Applied Surface Science**, v. 398, p. 15–18, 2017.

DUAN, W.; LI, X.; WANG, Y.; QIANG, R.; TIAN, C.; WANG, N.; HAN, X.; DU, Y. Surface functionalization of carbonyl iron with aluminum phosphate coating toward enhanced anti-oxidative ability and microwave absorption properties. **Applied Surface Science**, v. 427, p. 594–602, 2018.

EL MOSTRAH, A.; MULLER, A.; FAVENNEC, J. F.; POTELON, B.; MANCHEC, A.; RIUS, E.; QUENDO, C.; CLAVET, Y.; DOUKHAN, F.; LE NEZET, J. An RF-MEMS-based digitally tunable SIW filter in X-band for communication satellite applications. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 9, n. 9, 2019.

ELHOSENY, M.; RAMÍREZ-GONZÁLEZ, G.; ABU-ELNASR, O. M.; SHAWKAT, S. A.; ARUNKUMAR, N.; FAROUK, A. Secure medical data transmission model for IoT-based healthcare systems. **IEEE Access**, v. 6, p. 20596–20608, 2018.

FARIAS, I. L. G. **Comprimidos mastigáveis de ferro carbonila para tratamento da anemia ferropriva de crianças menores de seis anos**. 2006. 50 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Farmacêuticas) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.

FENG, Y. B.; QIU, T.; SHEN, C. Y. Absorbing properties and structural design of microwave absorbers based on carbonyl iron and barium ferrite. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 318, n. 1/2, p. 8–13, 2007.

FOLGUEIRAS, L. C.; REZENDE, M. C. Compósitos absorvedores de radiação eletromagnética processados com materiais multicamadas a base de polímero condutor. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS, 2009. **Anais...** 2009

GAMA, A. M. **Comportamento da permissividade e permeabilidade complexas, de 2 a 18 GHz, de absorvedores de micro-ondas à base de ferro carbonila e ferrita MnZn**. 2009. 150 p. Tese (Doutorado em Física e Química dos Materiais Aeroespaciais) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2009.

GAO, X.; WU, X.; QIU, J. High electromagnetic waves absorbing performance of a multilayer-like structure absorber containing activated carbon hollow porous fibers–carbon nanotubes and Fe₃O₄ nanoparticles. **Advanced Electronic Materials**, v. 4, n. 5, p. 1–7, 2018.

GARCIA, G. S.; RACHADEL, P. L.; MACHADO, R. A. F.; HOTZA, D.; COSTA, J. C. D. Mixed ionic-electronic conducting membranes (MIEC): composition, preparation, and performance. **Química Nova**, v. 37, n. 2, p. 302–307, 2014.

GHASEMI, A. Magnetic properties of substituted strontium ferrite nanoparticles and thin films. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 324, n. 7, p. 1375–1380, 2012.

GOMES, A. C. **Estudo da estrutura e propriedades magnéticas e elétricas de ferritas de Ni²⁺/Zn²⁺ dopadas com Nd³⁺**. 2014. 2014 p. Tese (Doutorado em Química) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2014.

GOTO, D.; SHIBAYAMA, H.; YAMASHITA, F.; YAMAZATO, T. LEO-MIMO Satellite systems for high capacity transmission. In: IEEE GLOBAL COMMUNICATIONS CONFERENCE, 2018. **Proceedings...** 2019. p. 1–6.

GRUSHEVENKO, E. A.; BORISOV, I. L.; BAKHTIN, D. S.; BONDARENKO, G. N.; LEVIN, I. S.; VOLKOV, A. V. Silicone rubbers with alkyl side groups for C₃+ hydrocarbon separation. **Reactive and Functional Polymers**, v. 134, p. 156–165, 2019.

GU, J.; JIANG, K. C.; LING, J. T.; ZHANG, M. L.; QU, J. Q. A satellite navigation signal acquisition and interference suppression method in a complex electromagnetic environment. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 1060, n. 1, 2018.

GUPTA, S.; CHANG, C.; LAI, C. H.; TAI, N. H. Hybrid composite mats composed of amorphous carbon, zinc oxide nanorods and nickel zinc ferrite for

tunable electromagnetic interference shielding. **Composites Part B: Engineering**, v. 164, p. 447–457, 2019.

IDA, N. **Engineering electromagnetics**. 3.ed. Akron, OH, USA: Springer, 2015. 28 p. ISBN 978-3-319-07805-2.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS - INPE. **INPE recebe sinais de telemetria e realiza testes de câmeras do satélite CBERS-4**.

Disponível em:

<http://www.cbbers.inpe.br/noticias/noticia.php?Cod_Noticia=3799>. Acesso em: 3 mar. 2020.

ISLAM, S. S.; RAHMAN, M. A.; FARUQUE, M. R. I.; ISLAM, M. T. Design and analysis with different substrate materials of a new metamaterial for satellite applications. **Science and Engineering of Composite Materials**, v. 25, n. 1, p. 59–66, 2018.

JEDDI, J.; KATBAB, A. A.; MEHRANVARI, M. Investigation of microstructure, electrical behavior, and EMI shielding effectiveness of silicone rubber/carbon black/nanographite hybrid composites. **Polymer Composites**, v. 40, n. 10, p. 4056–4066, 2019.

JOSEPH, J.; MUNDA, P. R.; JOHN, D. A.; SIDPARA, A. M.; PAUL, J. Graphene and CNT filled hybrid thermoplastic composites for enhanced EMI shielding effectiveness. **Materials Research Express**, v. 6, n. 8, 2019.

KASHI, S.; VARLEY, R.; SOUZA, M.; AL-ASSAFI, S.; DI PIETRO, A.; LAVIGNE, C.; FOX, B. Mechanical, thermal, and morphological behavior of silicone rubber during accelerated aging. **Polymer - Plastics Technology and Engineering**, v. 57, n. 16, p. 1687–1696, 2018.

KATO, Y.; TAKEI, T. **The first commercial applications of ferrite**. Japan: [s.n.], 1932.

KHURRAM, A. A.; RAKHA, S. A.; ZHOU, P.; SHAFI, M.; MUNIR, A. Correlation of electrical conductivity, dielectric properties, microwave absorption, and matrix properties of composites filled with graphene nanoplatelets and carbon nanotubes. **Journal of Applied Physics**, v. 118, n. 4, 2015.

KIKUKAWA, N.; TAKEMORI, M.; NAGANO, Y.; SUGASAWA, M.; KOBAYASHI, S. Synthesis and magnetic properties of nanostructured spinel ferrites using a glycine-nitrate process. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 284, n. 1–3, p. 206–214, 2004.

KINGERY, W. D. **Introduction to ceramics**. New York; London: Wiley, 1976. ISBN 81664.

- KRAUS, R. H. The overview and history of permanent magnet devices in accelerator technology. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 30, n. 4, p. 1547–1554, 1994.
- KUMARI, R.; BEHERA, S. K. Capacitive coupled frequency independent dielectric resonator antenna array for X-band applications. **IETE Journal of Research**, p. 1–8, 2019.
- LAWRENCE H. V. **Princípios de ciência dos materiais**. [S.l.]: Edgard Blucher, 1970. 448 p. ISBN 9788521201212.
- LI, J.; XIE, Y.; LU, W.; CHOU, T. W. Flexible electromagnetic wave absorbing composite based on 3D rGO-CNT-Fe₃O₄ ternary films. **Carbon**, v. 129, p. 76–84, 2018a.
- LI, J.; ZHAO, X.; LIU, J.; ZHANG, L.; YANG, C. Ultralight carbon-based Co(OH)₂-Co₃O₄ / nanocomposite with superior performance in wave absorption. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 777, p. 954–962, 2019.
- LI, Y. Optical properties of plasmonic materials. **Plasmonic optics: theory and applications**. [S.l.]: Spie Press, 2017.
- LI, Y.; LIU, X.; LIU, R.; PANG, X.; ZHANG, Y.; QIN, G.; ZHANG, X. Improved microwave absorption properties by atomic-scale substitutions. **Carbon**, v. 139, p. 181–188, 2018b.
- LIU, F.; MASOUIROS, C.; LI, A.; SUN, H.; HANZO, L. MU-MIMO Communications with MIMO radar: from co-existence to joint transmission. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, v. 17, n. 4, p. 2755–2770, 2018a.
- LIU, S.; WEI, K.; CHENG, Y.; YAN, S.; HE, L.; DENG, L. Structural, magnetic and microwave electromagnetic properties in La-substituted quaternary ferrite. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 791, p. 469–476, 2019a.
- LIU, T.; ZHOU, L.; ZHENG, D.; LIU, L.; XU, Y. Characteristics of oxidized Fe topcoat and its effects on the absorbing property of carbonyl iron coating. **Journal of Electronic Materials**, v. 48, n. 6, 2019b.
- LIU, Y.; CHEN, Z.; ZHANG, Y.; FENG, R.; CHEN, X.; XIONG, C.; DONG, L. Broadband and lightweight microwave absorber constructed by in situ growth of hierarchical CoFe₂O₄/reduced graphene oxide porous nanocomposites. **ACS Applied Materials and Interfaces**, v. 10, n. 16, p. 13860–13868, 2018b.
- LUDWIG, G. H. Cosmic-ray instrumentation in the first U. S. Earth Satellite. **The Review of Scientific Instruments**, v. 30, n. 4, p. 223–229, 1959.

MA, J.; WANG, X.; CAO, W.; HAN, C.; YANG, H.; YUAN, J.; CAO, M. A facile fabrication and highly tunable microwave absorption of 3D flower-like Co₃O₄-rGO hybrid-architectures. **Chemical Engineering Journal**, v. 339, p. 487–498, 2018.

MARKS, R. B. Formulations of the basic vector network analyzer error model including switch-terms. In: ARFTG CONFERENCE DIGEST - FALL MEASUREMENT TECHNIQUES FOR DIGITAL WIRELESS APPLICATIONS, 1997. **Proceedings....** 1997. p. 115–126.

MEKNI, O.; GOEURIOT, D.; SÃO JOÃO, S.; MEUNIER, C.; DAMAMME, G.; MEKNI, O.; RAOUADI, K. Grains size effect on charge trapping in electron irradiated ceramics: stability and discharge study using a special arrangement in a scanning electron microscope. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON DIELECTRICS, 2016. **Proceedings...** 2016. p. 139–142.

MENG, F.; WANG, H.; HUANG, F.; GUO, Y.; WANG, Z.; HUI, D.; ZHOU, Z. Graphene-based microwave absorbing composites: a review and prospective. **Composites Part B: Engineering**, v. 137, p. 260–277, 2018.

NAM, Y. W.; CHOI, J. H.; HUH, J. M.; LEE, W. J.; KIM, C. G. Thin broadband microwave absorber with conductive and magnetic materials coated on a glass fabric. **Journal of Composite Materials**, v. 52, n. 10, p. 1413–1420, 2018.

NORTHCUTT, L. A.; ORSKI, S. V.; MIGLER, K. B.; KOTULA, A. P. Effect of processing conditions on crystallization kinetics during materials extrusion additive manufacturing. **Polymer (United Kingdom)**, v. 154, p. 182–187, 2018.

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

OTT, H. W. **Electromagnetic compatibility engineering**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2001. 843 p. ISBN 9780470189306.

OTT, H. W. **Electromagnetic compatibility engineering**. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2009. ISBN 9780470508510.

PAUL, C. R. **Introduction to electromagnetic compatibility**. 2. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2009. 983 p. ISBN 9780471755005.

POURZAHEDI, L.; ZHAI, P.; ISAACS, J. A.; ECKELMAN, M. J. Life cycle energy benefits of carbon nanotubes for electromagnetic interference (EMI) shielding applications. **Journal of Cleaner Production**, v. 142, p. 1971–1978, 2017.

POZAR, D. M. **Microwave engineering**. 4. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011. 752 p. ISBN 9783540773405.

RAMOA, S. D. A. S.; BARRA, G. M. O.; MERLINI, C.; LIVI, S.; SOARES, B. G.; PEGORETTI, A. Electromagnetic interference shielding effectiveness and microwave absorption properties of thermoplastic polyurethane/montmorillonite-polypyrrole nanocomposites. **Polymers for Advanced Technologies**, v. 29, n. 5, p. 1377–1384, 2018.

RANJAN, P.; SUR, S.; PANDLEY, V. K. Multiple mode resonator based triple band filter for WLAN, intelligent transportation system, satellite communication and X-band applications. In: ANNUAL INFORMATION TECHNOLOGY, ELECTROMECHANICAL ENGINEERING AND MICROELECTRONICS CONFERENCE (IEMECON), 9., 2019. **Proceedings...** 2019.

RATH, C.; SAHU, S. S.; ANAND, S.; DATE, S. K.; MISHRA, N. C.; DAS, R. P. Preparation and characterization of nanosize Mn-Zn ferrite. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 202, n. 5, p. 77–84, 1999.

RAVEENDRAN, A.; SEBASTIAN, M. T.; RAMAN, S. Applications of microwave materials: a review. **Journal of Electronic Materials**, v.48, n.5, p.2601-2634, 2019.

REZENDE, M. C.; BOTELHO, E. C. O uso de compósitos estruturais na indústria aeroespacial. **Polímeros**, v. 10, n. 2, e4–e10, 2000.

RODRIGUES, M. K. C. **Estudo da viabilização do uso da mistura híbrida ferrocarbonila/ferrita de Ni_{0,5}Zn_{0,5}Fe₂O₄ como material absorvedor de radiação eletromagnética**. 2010. 111p. Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.

SADIKU, M. N. O. **Elements of electromagnetics**. 4. ed. Oxford: Oxford University Press, 2014. 702 p. ISBN 019535197.

SAINI, P.; ARORA, M. **Microwave absorption and EMI shielding behavior of nanocomposites based on intrinsically conducting polymers, graphene and carbon nanotubes**. [S.l.]: Intechopen, 2012.

SHAO, Y.; LU, W.; CHEN, H.; XIAO, J. Q.; QIU, Y.; CHOU, T. W. Flexible ultra-thin Fe₃O₄/MnO₂ core-shell decorated CNT composite with enhanced electromagnetic wave absorption performance. **Composites Part B: Engineering**, v. 144, p. 111–117, 2018.

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.

SIMAYEE, M.; MONTAZER, M. A protective polyester fabric with magnetic properties using mixture of carbonyl iron and nano carbon black along with aluminium sputtering. **Journal of Industrial Textiles**, v. 47, n. 5, p. 674–685, 2018.

SINGH, R.; BAHREL, S.; NARANG, S. B. Dielectric and microwave reflection properties of M-phase LNT (Li-Nb-Ti-O) solid solutions in X-band frequency range. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 784, p. 668–675, 2019.

SNOEK, J. L. Magnetic and electrical properties of the binary systems MO. Fe₂O₃. **Physica**, v. 3, n. 6, p. 463–483, 1936.

SONEHARA, M.; YAMAGUCHI, S.; MIYAJIMA, Y.; SATO, T.; INOMATA, T.; ONO, Y. Characterization of UHF band LC filter with RF spiral inductor using carbonyl-iron powder/epoxy composite magnetic and chip capacitor. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 53, n. 11, 2017.

SONG, J.; WANG, L.; XU, N.; ZHANG, Q. Microwave electromagnetic and absorbing properties of Dy³⁺ doped MnZn ferrites. **Journal of Rare Earths**, v. 28, n. 3, p. 451–455, 2010.

ULABY, F. T. **Eletromagnetismo para engenheiros**. [S.I.]: Bookman, 2006. 382 p. ISBN 978-85-600-3119-1.

VALENZUELA, R. **Magnetic ceramics**. Cambridge: Cambridge University Press, 1994. ISBN 9780511600296.

VARGAS-BERNAL, R. **Electromagnetic compatibility for space systems design**. [S.I.]: IGI Global, 2018. 346 p. ISBN 9781522554158.

VINAYKUMAR, R.; BERA, J. Low-temperature sintering of SrCo_{1.5}Ti_{1.5}Fe₉O₁₉ ferrite and its characterization for X-band antenna application. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 790, p. 413–420, 2019.

VINOD, S.; JOHN, R.; PHILIP, J. Magnetorheological properties of sodium sulphonate capped electrolytic iron based MR fluid: a comparison with Cl based MR fluid. **Smart Materials and Structures**, v. 26, n. 2, 2017.

VORST, A. VANDER; ROSEN, A.; KOTSUKA, Y. **RF/microwave interaction with biological tissues**. [S.I.]: John Wiley & Sons, 2006. 330 p. ISBN 047173277X.

WANG, H.; MENG, F.; HUANG, F.; JING, C.; LI, Y.; WEI, W.; ZHOU, Z. Interface modulating CNTs@PANi hybrids by controlled unzipping of the walls of CNTs to achieve tunable high-performance microwave absorption. **ACS Applied Materials and Interfaces**, v. 11, n. 12, p. 12142–12153, 2019.

WANG, Y.; SONG, C.-L.; WANG, L.; MA, X.-C.; XUE, Q.-K. Scanning tunneling microscopic study of the interface superconductivity. **Surface Review and Letters**, v. 25, Supp 1, p. 1841001, 2018a.

WANG, Y.; WU, X.; ZHANG, W.; LUO, C.; LI, J.; WANG, Y. Fabrication of flower-like Ni_{0.5}Co_{0.5}(OH)₂@PANI and its enhanced microwave absorption performances. **Materials Research Bulletin**, v. 98, p. 59–63, 2018b.

WASEDA, Y.; MATSUBARA, E.; SHINODA, K. **X-ray diffraction crystallography**. Berlin, Heidelberg: Springer, 2011. v. 46, 310 p. ISBN 978-3-642-16634-1.

XIA, L.; ZHANG, X.; YANG, Y.; ZHANG, J.; ZHONG, B.; ZHANG, T.; WANG, H. Enhanced electromagnetic wave absorption properties of laminated SiCNW-Cf/lithium–aluminum–silicate (LAS) composites. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 748, p. 154–162, 2018.

XU, W.; PAN, Y. F.; WEI, W.; WANG, G. S.; QU, P. Microwave absorption enhancement and dual-nonlinear magnetic resonance of ultra small nickel with quasi-one-dimensional nanostructure. **Applied Surface Science**, v. 428, p. 54–60, 2018.

XU, W.; WANG, G. S.; YIN, P. G. Designed fabrication of reduced graphene oxides/Ni hybrids for effective electromagnetic absorption and shielding. **Carbon**, v. 139, p. 759–767, 2018.

YAN, F.; KANG, J.; ZHANG, S.; LI, C.; ZHU, C.; ZHANG, X.; CHEN, Y. Enhanced electromagnetic wave absorption induced by void spaces in hollow nanoparticles. **Nanoscale**, v. 10, n. 39, p. 18742–18748, 2018a.

YAN, Y. Q.; CAI, H. P.; LIAO, Z. Q.; XIAO, H. B. Microwave absorption properties of absorber based on polyaniline coated porous carbonyl iron powder and graphene sheets/epoxy composites. **Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures**, v. 13, n. 1, p. 107–114, 2018b.

YANG, Z. H.; CHE, Y. X.; SUN, X.; ZHANG, J. L.; TIAN, J. X.; YU, H. T.; HUANG, Q. Broadband polarization-insensitive microwave-absorbing composite material based on carbon nanotube film metamaterial and ferrite. **Journal of Applied Physics**, v. 125, n. 18, 2019.

ZANATTA, S. C. **Síntese das granadas GdIG e YIG por moagem de alta energia**. 2006. 206p. Tese (Doutorado em Física) - Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2006.

ZHANG, W.; BIE, S.; CHEN, H.; LU, Y.; JIANG, J. Electromagnetic and microwave absorption properties of carbonyl iron/MnO₂ composite. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 358–359, p. 1–4, 2014.

ZHANG, Y.; ZHAO, J.; CAO, J.; MAO, B. Microwave metamaterial absorber for non-destructive sensing applications of grain. **Sensors (Switzerland)**, v. 18, n. 6, 2018.

ZHU, B. Y.; MIAO, P.; KONG, J.; ZHANG, X. L.; WANG, G. Y.; CHEN, K. J. Co/C composite derived from a newly constructed metal-organic framework for effective microwave absorption. **Crystal Growth and Design**, v. 19, n. 3, p. 1518–1524, 2019a.

ZHU, X.; JIANG, C.; KUANG, L.; GE, N.; GUO, S.; LU, J. Cooperative transmission in integrated terrestrial-satellite networks. **IEEE Network**, p. 1–7, 2019b.

APÊNDICE A - ESCALA DECIBEL

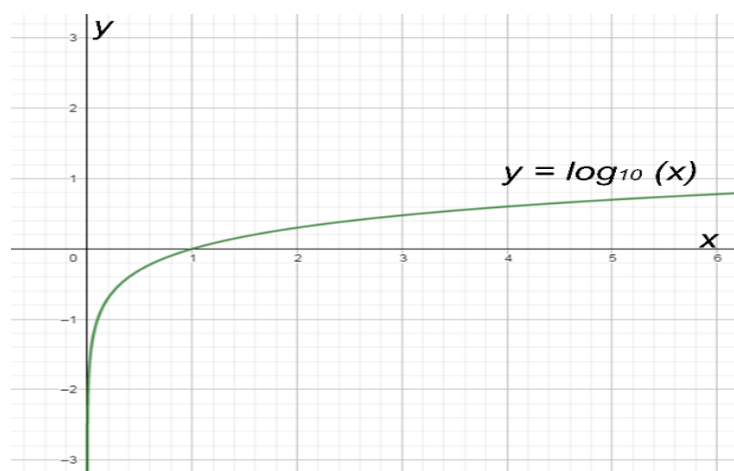
A escala decibel é uma unidade muito utilizada ao se tratar de conceitos elétricos da engenharia. Neste sentido, esta unidade se baseia nos valores definidos pelo logaritmo com base 10 no qual seu argumento é definido por uma razão de potências no qual é demonstrado na Equação A.1 (PAUL, 2009; POZAR, 2011).

$$dB = 10 \log_{10} \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \quad (A.1)$$

Onde, P_1 é definido como potência incidente no material, e P_2 a potencia em relação à resposta do material, esta pode ser devido ao fenômeno de reflexão ou transmissão.

A escala decibel, denota o nome do pesquisador Alexander Graham Bell, e é muito utilizada principalmente para definir razões de potenciais acústicos e em casos de compatibilidade eletromagnética (POZAR, 2011). A escala pode resultar em valores negativo, no qual a razão de potencias denota que o sinal de respostas é menor em relação ao sinal incidente ($P_2 < P_1$), ou resultar em valores positivos que denota que o sinal de resposta é maior em relação ao sinal incidente ($P_2 > P_1$). O comportamento da função log com base 10 é demonstrado na Figura A.1, no qual é possível observar que a escala se torna nula quando os valores de excitação e resposta são similares ($P_2 = P_1$).

Figura A.1 - Comportamento da função log com base 10.

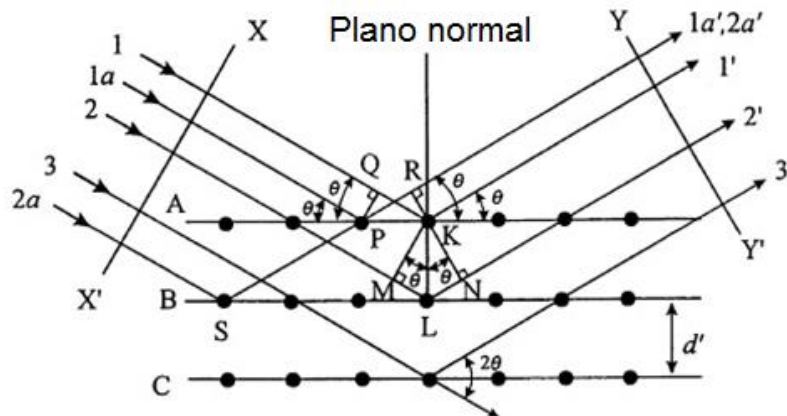


Fonte: Produção do autor.

APÊNDICE B - TÉCNICA DE CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL

A técnica de Difractometria de Raio X (DRX) é uma análise não destrutiva utilizada para indicar qual o possível arranjo cristalino do material de acordo com as redes de Bravais. Um material cristalino ao ser exposto a uma radiação com comprimento de onda equivalente a ordem de grandeza dos parâmetros de rede interna do material, indicará uma difração da radiação. Este fenômeno é demonstrado pela representação esquemática na Figura B.1 (WASEDA; MATSUBARA; SHINODA, 2011).

Figura B.1 - Representação esquemática de um diagrama de difração de Raio X por um cristal



Fonte: Adaptado de Waseda, Matsubara e Shinoda (2011).

A resposta do material também depende do ângulo incidente, e segundo a lei de Bragg existe uma relação entre o comprimento de onda λ , ângulo incidente da radiação θ e distância entre os planos cristalinos d conforme a Equação B.1 (WASEDA; MATSUBARA; SHINODA, 2011)

$$2d \operatorname{sen} \theta = n\lambda \quad (\text{B.1})$$

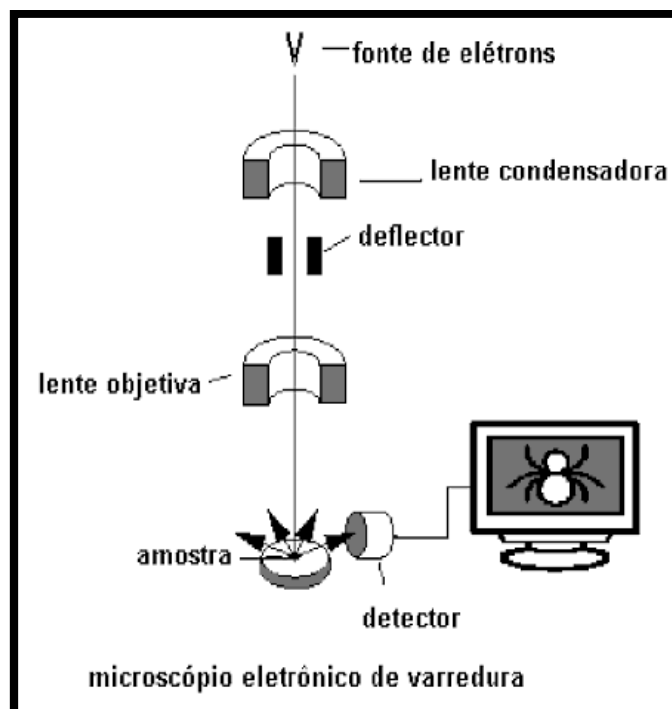
Onde n é um número inteiro de comprimento de onda.

A estrutura do DRX consiste em um filamento, que ao ser aquecido por uma corrente elétrica gera a emissão de Raio X sobre a superfície de uma amostra. O sinal é refletido na superfície da amostra e retorna a um sensor que identifica a resposta difratada. Se a estrutura do sólido possuir uma organização regular ao longo de distâncias atômicas, o material é denominado cristalino, e sua resposta à exposição de radiação serão picos intensos. Um software do dispositivo faz a leitura do sinal recebido correspondente a interação da radiação do filamento com os parâmetros de rede da amostra. E então é possível identificar pela posição dos picos quais os possíveis parâmetros de rede e sua respectiva estrutural cristalina (WASEDA; MATSUBARA; SHINODA, 2011).

APÊNDICE C - TÉCNICA DE CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA

Um Microscópio Eletrônico por Varredura (MEV) utiliza a emissão de elétrons para observar detalhes da superfície de um determinado material. No dispositivo, um filamento de tungstênio é aquecido por uma corrente elétrica e que atua como fonte de elétrons. Os elétrons são emitidos na superfície da amostra e a reflexão é captada por um detector. O sinal captado gera uma imagem topográfica da amostra possibilitando a análise da microestrutura superficial do material. A profundidade de penetração dos elétrons pode variar dependendo da energia dos elétrons emitidos pelo filamento. Utilizando diferentes profundidades é possível caracterizar diferentes camadas e aspectos como: diferentes componentes ou fases presentes no material (MEKNI et al., 2016). A Figura C.1 demonstra de forma resumida os componentes de um MEV (DEDAVID; GOMES; MACHADO, 2007).

Figura C.1- Representação esquemática de um microscópio eletrônico de varredura



Fonte: Adaptado de Dedavid, Gomes e Machado (2007).

A imagem gerada no MEV pode ser obtida a partir de diferentes sinais emitidos pela amostra, como por exemplo, o sinal dos elétrons espalhados ou também

conhecido no idioma inglês como *scattered electrons* (SE) e/ou o sinal dos elétrons retroespalhados, ou também conhecido no idioma inglês como *backscattered electrons* (BSE). Os SE são de baixa energia (<50eV) e normalmente utilizados para observar o relevo da superfície. Os BSE possuem energia relativamente maiores (>50 eV) e interagem de forma inelástica com os átomos da superfície. Normalmente os BSE são utilizados para observar diferença de fase (MEKNI et al., 2016) (DEDAVID; GOMES; MACHADO, 2007).

APÊNDICE D - FICHAS CRISTALOGRÁFICAS

Ficha cristológica da ferrita MnZn utilizando o software Match!

Entry exported from Match! User Database

Entry No.: 96-230-0585

Data published by:

COD (Crystallography Open Database)

Phase Classification

Formula sum: Fe₂ Mn_{0.6} O₄ Zn_{0.4}

Sample name: 2300584

I/lc : 6.06

Quality: C (calculated)

Reference: Koenig U., Chol G., "Roentgenbeugungs- und Neutronenbeugungsuntersuchungen an Ferriten der Reihe Mn_x Zn_{1-x} Fe₂ O₄", Journal of Applied Crystallography 1, 124-126 (1968).

Origin of Data

Entry source: COD (Crystallography Open Database);

<http://www.crystallography.net>

Orig. entry no: 2300584

Crystal Structure

Published crystallographic data:

Space group: F d -3 m (227)

Crystal system: cubic

Cell parameters: a=8.4975 Å

Formula units (Z): 8

Atomic coordinates:

Element	x	y	z	Bi	Focc
---------	---	---	---	----	------

Mn	0.000000	0.000000	0.000000	1.0000	0.6000
O	0.386600	0.386600	0.386600	1.0000	1.0000
Zn	0.000000	0.000000	0.000000	1.0000	0.4000
Fe	0.625000	0.625000	0.625000	1.0000	1.0000

Diffraction Data

Published diffraction lines:

Wavelength used for calculation of 2theta values: $\lambda = 1.541874 \text{ \AA}$

d	2theta	Int.	h	k	l	Mult.
4.9060	18.0819	104.03	1	1	1	8
3.0043	29.7380	320.02	2	0	2	12
2.5621	35.0235	1000.00	1	3	1	24
2.4530	36.6348	84.82	2	2	2	8
2.1244	42.5569	182.34	0	4	0	6
1.9495	46.5896	0.70	3	1	3	24
1.7345	52.7777	97.71	2	4	2	24
1.6353	56.2532	333.33	1	5	1	24
1.5022	61.7570	389.36	4	0	4	12
1.4363	64.9236	9.77	5	1	3	48
1.4163	65.9606	0.22	6	0	0	6
1.3436	70.0307	32.25	6	0	2	24
1.2959	73.0145	81.44	3	5	3	24
1.2810	73.9982	38.35	2	6	2	24
1.2265	77.8883	20.32	4	4	4	8
1.1899	80.7680	6.02	1	7	1	24
1.1355	85.5194	39.18	6	2	4	48

1.1063	88.3533	117.75	7	1	3	48
1.0622	93.0711	43.47	0	8	0	6
1.0381	95.9097	0.14	3	7	3	24
1.0305	96.8588	0.04	8	0	2	24
1.0014	100.6770	19.94	6	0	6	12
0.9812	103.5715	73.84	5	7	1	48
0.9747	104.5438	17.65	6	2	6	24
0.9500	108.4797	23.13	8	0	4	24
0.9327	111.4910	2.91	1	9	1	24
0.9272	112.5083	0.29	8	2	4	48
0.9058	116.6581	7.82	6	4	6	24
0.8908	119.8712	67.89	9	1	3	48
0.8673	125.4760	124.30	4	8	4	24
0.8540	129.0316	1.95	7	1	7	24
0.8332	135.4027	34.79	10	0	2	24
0.8215	139.5918	116.97	9	1	5	48
0.8177	141.0694	29.67	2	10	2	24
0.7924	153.2708	7.39	9	3	5	48
0.7890	155.4507	0.43	10	0	4	24

Experimental

Physical properties:

Calc. density: 5.08300 g/cm³

Remarks

Comments:

- Diffraction pattern calculated by Match!.

- I/Ic calculated by Match!.

- Space group has been derived from given symmetry operations.

Ficha cristológica da ferrocarbonila utilizando o software Match!

Entry exported from Match! User Database

Entry No.: 96-152-3169

Data published by:

COD (Crystallography Open Database)

Phase Classification

Formula sum: Fe_{0.94} Rh_{0.06}

Sample name: 1523168

I/Ic: 13.96

Quality: C (calculated)

Reference: Abrahamson E.P., Lopata S.L., "The lattice parameters and solubility limits of alpha-iron as affected by some binary transition-element additions", Transactions of the Metallurgical Society of AIME 236, 76-87 (1966).

Origin of Data

Entry source: COD (Crystallography Open Database);

<http://www.crystallography.net>

Orig. entry no: 1523168

Crystal Structure

Published crystallographic data:

Space group: I m -3 m (229)

Crystal system: cubic

Cell parameters: a=2.8884 Å

Formula units (Z): 2

Atomic coordinates:

Element	x	y	z	Bi	Focc
Fe	0.000000	0.000000	0.000000	1.0000	0.9400
Rh	0.000000	0.000000	0.000000	1.0000	0.0600

Diffraction Data

Published diffraction lines:

Wavelength used for calculation of 2theta values: $\lambda = 1.541874 \text{ \AA}$

d	2theta	Int.	h	k	l	Mult.
2.0424	44.3535	1000.00	1	0	1	12
1.4442	64.5273	131.17	2	0	0	6
1.1792	81.6557	223.74	2	1	1	24
1.0212	98.0385	67.92	2	0	2	12

Experimental

Physical properties:

Calc. density: 8.08600 g/cm^3

Remarks

Comments: - Diffraction pattern calculated by Match!.

- I/Ic calculated by Match!.

APÊNDICE E - TRABALHOS DESENVOLVIDOS AO LONGO DO MESTRADO

Vergara, D. E. F., Lopes, B. H. K., Quirino, S. F., Boss, A. F. N., Amaral-Labat, G. A., & Baldan, M. R. (2019). Frequency Selective Surface Properties of Microwave New Absorbing Porous Carbon Materials Embedded in Epoxy Resin. *Materials Research*, v. 22. **(JCR 2019 - 1,103)**.

DO AMARAL JUNIOR, MIGUEL ANGELO; MARCUZZO, JOSSANO SALDANHA; PINHEIRO, BÁRBARA DA SILVA; LOPES, BRAULIO HAKUO KONDO; DE OLIVEIRA, ANA PAULA SILVA; MATSUSHIMA, JORGE TADAO; BALDAN, MAURÍCIO RIBEIRO. Study of reflection process for nickel coated activated carbon fiber felt applied with electromagnetic interference shielding. *Journal of Materials Research and Technology-JMR&T*, v. 1, p. 13, 2019. **(JCR 2019 - 3,398)**.

Portes, R. C., Lopes, B. H. K., do Amaral Junior, M. A., Florez-Vergara, D. E., Quirino, S. F., & Baldan, M. R. (2019). Effect of granulometric distribution on electromagnetic shielding effectiveness for polymeric composite based on natural graphite. *Science and Engineering of Composite Materials*, v. 26, p. 531-539. **(JCR 2019 - 0,77)**.

B. H. K. LOPES; R. C. PORTES; M. A. do AMARAL JUNIOR; D. E. FLOREZ-VERGARA; A. M. GAMA; V. A. SILVA; S. F. QUIRINO; M. R. BALDAN. X band electromagnetic property influence of multi-walled carbon nanotube in hybrid MnZn ferrite and Carbonyl iron composite. *Journal of Materials Research Technology-JMR&T*, v. 9, p. 2369-2375, 2020. **(JCR 2020 - 3,398)**.