



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÕES



sid.inpe.br/mtc-m21c/2021/04.21.12.54-TDI

MATERIAIS ABSORVEDORES DE RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA MULTICAMADA NA FAIXA DE FREQUÊNCIA 12,4 A 18,0 GHZ

Ariane Aparecida Teixeira de Souza

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores, orientada pelos Drs. Mauricio Ribeiro Baldan, e Alan Fernando Ney Boss, aprovada em 26 de fevereiro de 2021.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/44HFD72>>

INPE
São José dos Campos
2021

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Coordenação de Ensino, Pesquisa e Extensão (COEPE)
Divisão de Biblioteca (DIBIB)
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 - Coordenação-Geral de Ciências da Terra (CGCT)

Membros:

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação (CPG)
Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia, Tecnologia e Ciência Espaciais (CGCE)
Dr. Rafael Duarte Coelho dos Santos - Coordenação-Geral de Infraestrutura e Pesquisas Aplicadas (CGIP)
Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon
Clayton Martins Pereira - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)
André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Ivone Martins - Divisão de Biblioteca (DIBIB)
André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÕES



sid.inpe.br/mtc-m21c/2021/04.21.12.54-TDI

MATERIAIS ABSORVEDORES DE RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA MULTICAMADA NA FAIXA DE FREQUÊNCIA 12,4 A 18,0 GHZ

Ariane Aparecida Teixeira de Souza

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores, orientada pelos Drs. Mauricio Ribeiro Baldan, e Alan Fernando Ney Boss, aprovada em 26 de fevereiro de 2021.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/44HFD72>>

INPE
São José dos Campos
2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Souza, Ariane Aparecida Teixeira de.

So89m Materiais absorvedores de radiação eletromagnética multicamada na faixa de frequência 12,4 A 18,0 GHz / Ariane Aparecida Teixeira de Souza. – São José dos Campos : INPE, 2021.

xxii + 84 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21c/2021/04.21.12.54-TDI)

Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2021.

Orientadores : Drs. Mauricio Ribeiro Baldan, e Alan Fernando Ney Boss.

1. MARE. 2. Refletividade. 3. Ferrita de Manganês Zinco. 4. Carbetto de Silício. 5. Negro de Fumo. I.Título.

CDU 669.77/78:66.081.2



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/).



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÕES



INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

Serviço de Pós-Graduação - SEPGR

**DEFESA FINAL DE DISSERTAÇÃO DE ARIANE APARECIDA TEIXEIRA DE SOUZA
BANCA Nº 026/2021, REG 143308/2018**

No dia 26 de fevereiro de 2021, as 14h 30min, Online, o(a) aluno(a) mencionado(a) acima defendeu seu trabalho final (apresentação oral seguida de arguição) perante uma Banca Examinadora, cujos membros estão listados abaixo. O(A) aluno(a) foi APROVADO(A) pela Banca Examinadora, por unanimidade, em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de Mestra em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores. O trabalho precisa da incorporação das correções sugeridas pela Banca Examinadora e revisão final pelo(s) orientador(es).

**Título: "MATERIAIS ABSORVEDORES DE RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA
MULTICAMADA NA FAIXA DE FREQUÊNCIA 12,4 A 18,0 GHz"**

Eu, Mauricio Ribeiro Baldan, como Presidente da Banca Examinadora, assino esta ATA em nome de todos os membros.

Dr. Mauricio Ribeiro Baldan - Presidente/Orientador - INPE

Dr. Alan Fernando Ney Boss - Orientador - USP

Dr. Sergio Luiz Mineiro - Membro da banca - INPE

Dr. Rodrigo Gabas Amaro de Lima - Convidado - IEAv/EFA



Documento assinado eletronicamente por **Mauricio Ribeiro Baldan, Pesquisador**, em 20/04/2021, às 09:50 (horário oficial de Brasília), com fundamento no art. 6º do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <http://sei.mctic.gov.br/verifica.html>, informando o código verificador **6574694** e o código CRC **DD2FDEA1**.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por minha vida e por todas as oportunidades colocadas na minha trajetória e as minhas conquistas.

Agradeço a meus pais João e Elaine, que sempre me apoiaram e incentivaram em todas as minhas decisões e sempre foram um grande exemplo de determinação, comprometimento e responsabilidade para mim. A meu noivo e irmã pela paciência e a companhia nas horas que mais precisei.

Ao meu orientador e mentor Dr. Maurício Ribeiro Baldan, pela orientação, por todo apoio e incentivo do início ao fim deste trabalho, e pela oportunidade de realizar esse projeto.

Ao meu orientador e mentor Dr. Alan Fernando Boss, pela orientação, pela amizade e auxílio para planejamento de toda a trajetória do curso e desenvolvimento do projeto.

Aos Drs. Gisele e Sandro e, por todos os momentos de discussão e esclarecimentos pertinentes e principalmente pela amizade e incentivo pela colaboração, orientação e análises realizadas.

Ao Dr. Guilherme pelo incentivo e pela colaboração com o projeto.

Aos amigos do grupo P&DMA³, pela amizade de sempre, incentivo, apoio e auxílio que sempre me foram dispensados e os amigos do grupo DIMARE e ao Dr. José Evaldo Corat pelos auxílios nas técnicas de microscopia. O pessoal da sala, Aline, Manuela, Guilherme, Bráulio, Roberto, Raíssa, Camila, Lais, Camila, Marco e Bianca que mesmo com tantas obrigações, se disponibilizaram a me dar um suporte sempre que necessário. Em especial, agradeço a Ana Paula que sempre esteve disponível para qualquer tipo de coisa desde o meu primeiro dia de INPE.

À CAPES pela concessão da bolsa e por possibilitar que o meu trabalho fosse concretizado. Ao INPE, por ter disponibilizado equipamentos e infraestrutura para a realização deste sonho.

E finalmente, agradeço a todas as pessoas que, de alguma forma, estiveram envolvidas e colaboram, desde conselhos até com participações de trabalhos, pela amizade e carinho que tenho com todos.

RESUMO

Novas tecnologias sem fio surgem cada vez mais rápido e, atualmente, estamos cercados por poluição eletromagnética provida de dispositivos eletrônicos utilizados em nosso cotidiano, que pode causar interferência eletromagnética em outros dispositivos eletrônicos. Existem diferentes estratégias para evitar esta interferência, sendo uma delas o uso de materiais absorvedores de radiação eletromagnética (MARE), que podem se apresentar como um material uniforme ou uma estrutura multicamada. As estruturas multicamadas são formadas pela combinação de amostras de diferentes materiais e espessuras, sendo uma alternativa para obtenção de melhores resultados de refletividade. A validação de estruturas multicamadas é, geralmente, feita através de medidas no espaço livre, o que requer uma amostra muito grande. Neste trabalho, investigou-se a validação de estruturas multicamadas através de guia de onda retangular, que utiliza amostras consideravelmente menores. Foram produzidas e caracterizadas amostras a base de ferrita de Manganês Zinco (MnZn), Carbetto de Silício (SiC) e Negro de Fumo (NF) com frações mássicas de 60% e 70%, 40% e 50% e 1% e 2%, respectivamente, com espessuras entre 1,00 e 6,00 mm. Dentre essas amostras, foram selecionadas seis curvas, uma de cada composição, para compor um modelo teórico de escolha de melhores espessuras e refletividades das estruturas multicamadas. O melhor resultado experimental obtido através desta metodologia foi a estrutura MnZn60_4,27mm + SiC50_0,84mm, com aproximadamente -39,80 dB em 15,27 GHz, que equivale a mais de 99,9% de atenuação da onda incidente. O valor calculado para esta estrutura foi de -27,28 dB em 14,69 GHz. Tanto o deslocamento em frequência quanto a diferença de refletividade são explicados em detalhe no decorrer do trabalho. A metodologia proposta para escolha dos materiais e espessuras se mostrou eficaz, possibilitando a conclusão de que é possível validar uma amostra multicamada em guia de onda retangular. Assim, a utilização de uma metodologia simples e de amostras consideravelmente menores daquelas utilizadas no método de espaço livre é importante para economizar tempo e custos com a produção de materiais.

Palavras-chave: MARE. Refletividade. Ferrita de Manganês Zinco. Carbetto de Silício. Negro de Fumo.

MULTILAYER ELECTROMAGNETIC RADIATION ABSORBING MATERIALS IN THE MEMBER BAND 12.4 TO 18.0 GHz

ABSTRACT

New wireless technologies are emerging so fast that we are currently surrounded by an electromagnetic pollution caused by several electronic devices, which can cause electromagnetic interference in other electronic devices. There are different strategies to avoid this electromagnetic interference, and one of them is the usage of Radar Absorbing Materials (RAMs). These materials can be presented in a single layer or multilayer structure, where the combination of two or more layers usually provides better reflection losses with thinner samples. Multilayer structures are commonly validated using free-space measurements, but it requires large samples. Here, we investigated the validation of multilayer structures using rectangular waveguide, that requires smaller samples. RAMs using manganese zinc ferrite (MnZn), silicon carbide (SiC) and carbon black (CB) in concentrations of 60 wt% and 70 wt%, 40 wt% and 50 wt% and 1 wt% to 2 wt%, respectively, were made with thicknesses ranging from 1 to 6 mm. Six samples were selected to be use in a theoretical model, one of each concentration. This model was used to choose the best multilayer thickness and reflection loss in a simpler way. The best experimental reflection loss using this methodology was the MnZn60_4.27mm + SiC50_0.84mm structure, with -39.80 dB at 15.27 GHz, i.e., an attenuation higher than 99.9%. The calculated value was was -27,28 dB at 14.69 GHz. Both frequency shifting and reflection loss difference were explained in detail throughout the discussion section. The proposed methodology to choose thickness and samples was effective, which was crucial to reach the conclusion that multilayer RAMs can be validated using rectangular waveguide. Using a simple methodology and considerable smaller samples compared to those required for free-space analysis is important to save time and costs.

Keywords: RAM. Reflection Loss. Manganese Zinc ferrite. Silicon Carbide. Carbon Black.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 1.1 - Fotografia de uma câmara anecóica com um objeto entre antenas de emissão e recepção apontadas entre si.....	3
Figura 1.2 - Analisador de rede vetorial com guia de ondas coaxial.	4
Figura 2.1 - Caça furtivo F-117.....	8
Figura 2.2 - Geração dos momentos magnéticos atômicos (a) orbital do elétron em volta do núcleo e (b) rotação dos elétrons em volta de seu próprio eixo....	10
Figura 2.3 - Alinhamento dos spins (a) diamagnético, (b) ferromagnético, (c) paramagnético, (d) antiferromagnético e (e) ferrimagnético.....	12
Figura 2.4. Ilustração da propagação da onda eletromagnética.....	13
Figura 2.5 - Representação esquemática do guia de onda com modo de propagação TE ₁₀ da onda.	17
Figura 2.6 - Ilustração das linhas de campo para modo TE ₁₀ em guia retangular.	17
Figura 2.7. Sistema de reflexão/transmissão.	19
Figura 2.8. Configuração da medida NRW.....	20
Figura 2.9 - Esquema representativo metálica da medida de refletividade.	22
Figura 2.10 - Esquema simplificado do efeito de interação da onda com o MARE em multicamada.....	24
Figura 3.1 - Molde projetado com dimensões para banda K _u	27
Figura 3.2 - Amostras de (a) silicone puro, (b) NF, (c) MnZn e (d) SiC.	28
Figura 3.3 - Microscópio eletrônico de varredura com <i>field emission gun</i> da TESCAN.....	29
Figura 3.4 - Difratorômetro de raio X da PANalytical, série X'PertPRO.....	30
Figura 3.5 - Analisador de rede vetorial da Keysight acoplado ao guia de ondas retangular da banda K _u	30
Figura 3.6 - Representação (a) do guia de ondas retangular e das (b) dimensões do offset da banda K _u	31
Figura 3.7 - Vista lateral interna da configuração da medida de ϵ e μ	32
Figura 3.8 - Vista lateral interna da configuração da medida de refletividade. .	33

Figura 3.9 - Representação da estrutura multicamada com SiC+NF.	33
Figura 3.10 - Amostra com aditivo de SiC e NF para representação da estrutura multicamada com SiC+NF.....	34
Figura 4.1 - Imagem de MEV-FEG do NF com ampliação de 100 Kx.	35
Figura 4.2 - Imagem de MEV-FEG de MnZn com ampliação de 10 Kx.....	36
Figura 4.3 - Imagem de MEV-FEG do SiC com ampliação de 50 Kx.	36
Figura 4.4 - Difratoograma do NF em pó.....	37
Figura 4.5 - Difratoograma do SiC em pó.....	38
Figura 4.6 - Difratoograma do MnZn em pó.	38
Figura 4.7 - Valores de (a) permissividade complexa e (b) permeabilidade complexa das amostras de silicone sem aditivo.....	39
Figura 4.8 - Gráfico de (a) permissividade complexa e (b) de permeabilidade complexa das amostras MnZn60.	41
Figura 4.9 - Gráfico de (a) permissividade complexa e de (b) permeabilidade complexa das amostras MnZn70.	42
Figura 4.10 - Gráfico de (a) permissividade complexa e de (b) permeabilidade complexa das amostras de 1,0% de NF.....	43
Figura 4.10 Conclusão.	44
Figura 4.11 - Gráfico de (a) permissividade complexa e de (b) permeabilidade complexa das amostras de 2% de NF.....	44
Figura 4.11. Conclusão.	45
Figura 4.12 - Gráfico de (a) permissividade complexa e de (b) permeabilidade complexa das amostras de SiC40.....	46
Figura 4.13 - Gráfico de (a) permissividade complexa e de (b) permeabilidade complexa das amostras de SiC50.....	47
Figura 4.14 - Gráfico de (a) permissividade real, (b) permissividade imaginária, (c) permeabilidade real e (d) permeabilidade imaginária das amostras usadas para o cálculo dos gráficos 3D.	48
Figura 4.14. Conclusão.	49
Figura 4.15 - Refletividade (a) tridimensional da amostra com MnZn60, (b) destaque dos melhores resultados de refletividade 3D e (c) comparação da refletividade recalculada com a experimental.....	51

Figura 4.15 - Conclusão.	52
Figura 4.16 - Refletividade (a) tridimensional da amostra com MnZn70, (b) destaque dos melhores resultados de refletividade e (c) comparação da refletividade recalculada com o resultado experimental.	53
Figura 4.16 - Conclusão.	54
Figura 4.17 - Refletividade (a) tridimensional da amostra com NF1 e (b) comparação da refletividade recalculada com o resultado experimental.	55
Figura 4.18 - Refletividade (a) tridimensional da amostra com NF2 e (b) comparação da refletividade recalculada com o resultado experimental.	56
Figura 4.19. Refletividade (a) tridimensional da amostra de SiC40, (b) destaque dos melhores resultados de refletividade e (c) comparação da refletividade recalculada com o resultado experimental.	57
Figura 4.19 - Conclusão.	58
Figura 4.20. Refletividade (a) tridimensional da amostra com SiC50, (b) destaque dos melhores resultados de refletividade e (c) comparação da refletividade recalculada com o resultado experimental.	59
Figura 4.20 - Conclusão.	60
Figura 4.21 - Comparação entre as os valores de RL calculado com estrutura de (NF2+MnZn60).	62
Figura 4.22 - Comparação dos valores de RL calculados com espessuras reais, características eletromagnéticas reais e medida experimental na estrutura (NF2+MnZn60).	63
Figura 4.23 - Comparação entre as os valores de RL calculado com estrutura de (NF2+MnZn70).	63
Figura 4.24 - Comparação dos valores de RL calculados com espessuras reais, características eletromagnéticas reais e medida experimental da estrutura (NF2+MnZn70).	64
Figura 4.25 - Comparação entre as os valores de RL calculado com estrutura de (MnZn70+NF2).	65
Figura 4.26 -Comparação dos valores de RL calculados com espessuras reais, características eletromagnéticas reais e medida experimental (MnZn70+NF2)...	66

Figura 4.27 - Comparação entre as os valores de RL calculado com estrutura de (SiC40+MnZn60).....	67
Figura 4.28 - Comparação dos valores de RL calculados com espessuras reais, características eletromagnéticas reais e medida experimental da estrutura de (SiC40+MnZn60).....	68
Figura 4.29 - Comparação entre as os valores de RL calculado com estrutura de (SiC50+MnZn60).....	68
Figure 4.30 - Comparação dos valores de RL calculados com espessuras reais, características eletromagnéticas reais e medida experimental da estrutura de (SiC40+MnZn60).....	69
Figura 4.31 -Comparação entre as os valores de RL calculado com estrutura de (MnZn60+SiC50).....	70
Figura 4.32 - Comparação dos valores de RL calculados com espessuras reais, características eletromagnéticas reais e medida experimental da estrutura de (MnZn60+SiC50).....	71

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 2.1 - Frequência de corte, frequência de operação e dimensões para guias de onda retangulares.	18
Tabela 2.2 - Relação da refletividade em dB com a % de energia absorvida. .	23
Tabela 3.1 - Nomenclatura e composição das amostras.	27
Tabela 3.2 – Espessuras das amostras confeccionadas.	28

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

MARE	Material Absorvedor de Radiação Eletromagnética
RAM	<i>Radar Absorbing Materials</i>
RCS	<i>Radar Cross Section</i>
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
DRX	Difratômetro de Raio X
RL	Refletividade - <i>Reflection Loss</i>
MnZn	Ferrita Manganês Zinco
SiC	Carbeto de Silício
NF	Negro de fumo
VNA	Analizador de Rede Vetorial
EIA	<i>Electronics Industry Association</i> - EUA
IEC	<i>International Electrotechnical Commision</i> – Europeia
NRW	Nicolson Ross Weir
SOLT	<i>Short Open Load Through</i>
SWR	<i>Standing Wave Ratio</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

ϵ	Permissividade complexa
ϵ'	Parte real da permissividade
ϵ''	Parte imaginária da permissividade
μ	Permeabilidade complexa
μ'	Parte real da permeabilidade
μ''	Parte imaginária da permeabilidade
\vec{E}	Vetor campo elétrico
\vec{B}	Vetor de densidade de fluxo magnético
t	tempo
ρ	densidade
\vec{H}	Vetor campo magnético
\vec{D}	Vetor de densidade de fluxo elétrico
\vec{J}	Vetor densidade de corrente elétrica
f_c	Frequência de corte
a	Maior dimensão do guia de onda
n	Valores inteiros no modo de propagação
m	Valores inteiros no modo de propagação
b	Menor dimensão do guia de onda
S_{11}	Parâmetro de espalhamento de reflexão, emitido e medido pela porta 1
S_{21}	Parâmetro de espalhamento de transmissão, emitido pela porta 1 e medido pela porta 2
S_{12}	Parâmetro de espalhamento de transmissão, emitido pela porta 2 e medido pela porta 1

S_{22}	Parâmetro de espalhamento de reflexão, emitido e medido pela porta 2
R_2	Sinal refletido medido pela porta 2
I_1	Sinal incidente emitido pela porta 1
I_2	Sinal incidente emitido pela porta 2
R_1	Sinal refletido medido pela porta 1
E_1	Campo Elétrico na região 1
E_2	Campo Elétrico na região 2
E_3	Campo Elétrico na região 3
γ	Constante de propagação da onda
C	Constantes determinadas pelas condições de contorno
λ	Comprimento de onda
d	Espessura
f	Frequência
c	Velocidade da Luz
Z	Impedância
Λ	Termo do Parâmetro-S
K	Termo do Parâmetro-S
L	Comprimento
Γ	Coeficiente de Reflexão
T	Coeficiente de Transmissão
x	Distância entre a onda incidente e o plano de referência
γ_0	Constante de propagação da onda no vácuo

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Justificativa	2
1.2 Objetivo.....	5
1.2.1 Objetivo geral	5
1.2.2 Objetivo específico	5
1.3 Organização	5
2 Revisão bibliográfica.....	7
2.1 Estado da arte	7
2.2 Material Absorvedor de Radiação Eletromagnética.....	9
2.3 Propagação da onda eletromagnética	13
2.4 Equações de Maxwell	14
2.5 Linha de transmissão.....	15
2.6 Parâmetros S.....	18
2.7 Obtenção dos Parâmetros com Método de Nicolson Ross Weir – NRW...	19
2.8 Refletividade	22
2.9 Refletividade em multicamada.....	23
3 MATERIAIS E MÉTODOS	26
3.1 Preparação das amostras.....	26
3.2 Caracterizações morfológicas e estruturais	28
3.2.1 Microscopia eletrônica de varredura	28
3.2.2 Difratomia de Raio X.....	29
3.3 Caracterização eletromagnética	30
3.3.1 Medida de permissividade e permeabilidade	32
3.3.2 Medida de refletividade	32
3.3.3 Medida de refletividade em multicamadas	33
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	35
4.1 MEV-FEG	35
4.2 DRX	36
4.3 Análise das propriedades eletromagnéticas	38

4.4 Refletividade dos compósitos	49
4.5 Refletividade multicamada.....	60
5 CONCLUSÃO	72
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74
APÊNDICE A - FICHAS CRISTALOGRÁFICAS	78

1 INTRODUÇÃO

O avanço da tecnologia sem fio vem transformando a vida da sociedade rapidamente e de maneira significativa. Este avanço é dado por diversos dispositivos eletrônicos utilizados no cotidiano que, conseqüentemente, produzem uma poluição invisível que pode ser direta ou indiretamente prejudicial à saúde humana: a poluição eletromagnética (BAI et al., 2018; FANG et al., 2020).

Além disso, a poluição eletromagnética é, também, um desperdício de energia, já que não se reaproveita toda a radiação eletromagnética presente no ambiente (SHANAWANI et al., 2017). Essa energia dispersa no ambiente pode causar interferência eletromagnética entre dispositivos, afetando a transmissão de dados de sistemas de telecomunicações e até mesmo o monitoramento via satélite. Ainda, essa interferência pode causar danos à equipamentos médicos, comerciais, industriais e militares (ZHU et al., 2019b). Com isto, a exigência das legislações governamentais de controle de níveis de radiação eletromagnética vem aumentando em relação às normas industriais de compatibilidade e interferência eletromagnética, envolvendo as indústrias de eletrônicos (AMARAL, 2018).

Ao longo do tempo, muitos tipos de materiais e estruturas com capacidade de absorver a radiação eletromagnética foram desenvolvidos. Dentre eles, podemos citar os materiais absorvedores de radiação eletromagnética (MAREs) (GONG et al., 2015), as estruturas multicamadas (NOHARA, 2003) e as superfícies seletora de frequência (Lee et al., 2007).

Recentemente, MAREs têm sido explorados a fim de controlar a exposição e o aumento dos problemas de compatibilidade e interferência eletromagnética de dispositivos. Estes materiais também são partes essenciais na área de defesa, em todas as plataformas militares (Liu X et al., 2011; MORGAN., 1994).

Alguns MAREs são obtidos pela dispersão de um ou mais tipos de materiais absorvedores em uma matriz polimérica. Dentre as matrizes poliméricas mais utilizadas estão a borracha de silicone, a resina epóxi, a parafina, entre outras. Quanto aos materiais absorvedores, que apresentam perdas quando atingidos

por uma onda eletromagnética, tem-se as ferritas, a ferrocarbonila, os materiais carbonosos e os polímeros condutores. Os absorvedores são materiais que apresentam mecanismos de perda e diferentes formatos estruturais, como formas piramidais, múltiplas camadas e camadas únicas. Sua funcionabilidade tem como propósito reduzir a reflexão de radiações eletromagnéticas, absorvendo parte considerável da energia incidente. Como aplicação dessa funcionabilidade, podemos citar o comércio em câmaras anecóicas e revestimento para reduzir sinais refletidos. Com o crescimento do desenvolvimento de tecnologias de comunicações atual, a frequência de micro-ondas faz com que os MAREs apresentem alta demanda (GAMA et al., 2009; LIU et al., 2011; DE CASTRO DIAS, 2005; BARBA, 2006; GONG et al., 2015, LIU et al., 2014a; CHUNG, 2004; ZHANG et al., 2006; VERGARA et al., 2019; AHMAD et al., 2019).

Os MAREs costumam ter banda de frequência de absorção estreita e não são as melhores opções para combater os atuais sistemas de radares, que efetuam varreduras em diferentes faixas de frequência (WU et al., 2008; SONG et al., 2007; CAFFARENA et al., 2008; ZHANG et al., 2004; SAVILLE et al., 2005). Assim, visando a aplicação em banda larga, tem-se estudado materiais absorvedores combinados em camadas, ou seja, estruturas multicamadas, pois possuem uma grande flexibilidade e versatilidade no controle das propriedades eletromagnéticas (DATASHVILI et al., 2006). A estrutura multicamada consiste na junção de camadas de materiais diferentes acopladas ao longo da estrutura. Nesse tipo de estrutura, torna-se possível trabalhar com diferentes composições do mesmo material e/ou com materiais diferentes. Ao mesmo tempo, é possível minimizar a espessura sem prejudicar seu desempenho, idealizando a formação de um absorvedor mais leve (AMARAL, 2018).

1.1 Justificativa

O Brasil vem buscando autonomia para a obtenção de materiais absorvedores, uma vez que o acesso a este tipo de tecnologia é restrito por estar diretamente vinculado à setores estratégicos e de segurança nacional (JANI, 2017). Assim, diferentes materiais com características específicas vêm sendo pesquisados

em solo nacional, visando melhorar a capacidade de atenuação de ondas eletromagnéticas em diferentes faixas de frequências. Devido a necessidade de explorar várias faixas de frequências, diferentes métodos de caracterização dos materiais são utilizados, como o método do espaço livre, o guia de ondas coaxial e o guia de ondas retangular. (GOLÇALVES, 2012). Dentre as faixas de frequências, algumas já são bem exploradas na literatura, como a banda X, pois muitos dispositivos e radares operam nesta faixa de frequência. Já a faixa de frequência da banda K_u é pouco explorada, principalmente quando se trata de estruturas multicamadas.

A caracterização eletromagnética pode ser feita com diferentes métodos. O método de caracterização por espaço livre consiste em colocar o material entre duas antenas, uma de emissão e outra de recepção, que são apontadas entre si. Apesar de ser possível utilizar este método para caracterização de materiais, ele é mais utilizado para avaliar o espalhamento eletromagnético causado por um objeto, Figura 1.1. Este método permite a medida em diferentes ângulos e, geralmente, é aplicado dentro de uma câmara anecóica. A desvantagem de usar este método para caracterização de materiais é a alta quantidade material necessário para produção do corpo de prova (GOLÇALVES, 2012).

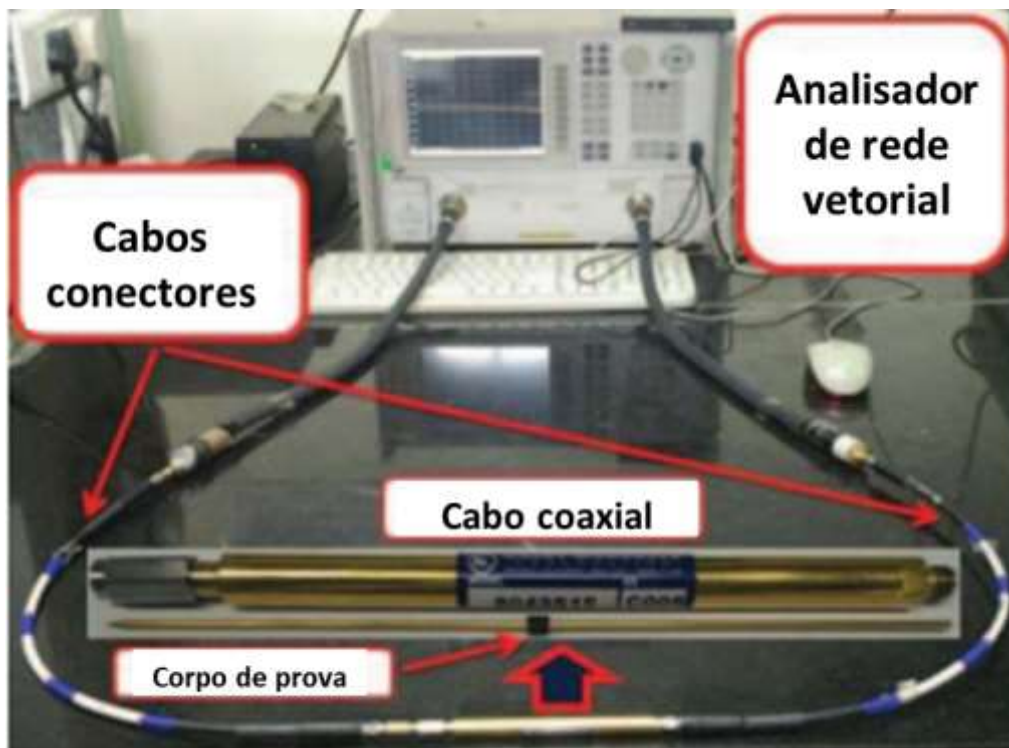
Figura 1.1 - Fotografia de uma câmara anecóica com um objeto entre antenas de emissão e recepção apontadas entre si.



Fonte: Adaptado de Gurgel (2016).

O guia de onda coaxial consiste em um tubo circular, com alta precisão mecânica e blindagem eletromagnética, e uma haste metálica, que atravessa a amostra, como na Figura 1.2. Esse método de caracterização é utilizado para medida das propriedades eletromagnéticas dos materiais em uma ampla faixa de frequência, geralmente de 2,0 – 18,0 GHz. É comum encontrar trabalhos com materiais caracterizados com o guia coaxial, em que as perdas por reflexão, ou refletividade, podem ser somente calculadas utilizando as propriedades medidas (ZHANG et al., 2006; CHAKRADHARY et al., 2017). Essa é uma das desvantagens deste tipo de guia, já que não é possível executar a validação experimental da refletividade (GONÇALVES, 2012). Outras desvantagens estão relacionadas com a fabricação do corpo de prova, que, apesar de pequeno, requer um formato cilíndrico com um furo centralizado e alta precisão em suas dimensões.

Figura 1.2 - Analisador de rede vetorial com guia de ondas coaxial.



Fonte: Adaptado de Chakradhary et al. (2017).

O guia de onda retangular, assim como o guia coaxial, consiste em um tubo metálico com alta precisão mecânica, porém com formato retangular. Neste dispositivo, além da caracterização das propriedades eletromagnéticas, podem

ser produzidos corpos de prova para medidas de perda por reflexão (SILVA, 2009). A onda eletromagnética se propaga dentro do sistema de linha de transmissão fechado e, quanto maior a frequência de trabalho, menor o comprimento de onda e, conseqüentemente, menor a dimensão do guia. Para a banda X, faixa de frequência compreendida entre 8,0 – 12,4 GHz, a seção transversal é de 23 x 10 mm, enquanto que para a banda K_u, faixa entre 12,4 – 18,0 GHz, as dimensões do guia são 15,7 x 7,9 mm (DE PAULA et al., 2008; JANI et al., 2017; GONÇALVES, 2012). A desvantagem deste método é a necessidade de utilizar diferentes guias de ondas para frequências diferentes. Porém, sua capacidade de medir a refletividade, mesmo que perpendicular à amostra, é atrativa. Apesar disto, não há trabalhos na literatura que exploram essa capacidade de validação experimental utilizando estruturas multicamadas.

1.2 Objetivo

1.2.1 Objetivo geral

O principal objetivo deste trabalho é projetar estruturas absorvedoras multicamadas e validá-las utilizando guia de onda retangular. A faixa de frequência escolhida para realizar este estudo é a banda K_u, que se encontra entre 12,4 e 18 GHz.

1.2.2 Objetivo específico

Para atingir o objetivo principal, são confeccionados diversos compósitos utilizando diferentes materiais, tais como a ferrita de Manganês Zinco (MnZn), o Carbetto de Silício (SiC) e o Negro de Fumo (NF). Estes materiais são caracterizados eletromagneticamente, e suas refletividades são avaliadas e comparadas, buscando as melhores espessuras de camadas para formar a estrutura multicamada. Outras caracterizações também são realizadas, tais como as morfológicas e estruturais.

1.3 Organização

Os capítulos desta dissertação estão organizados da seguinte maneira:

No 1º Capítulo foi introduzido o trabalho, seguido da justificativa do trabalho e dos objetivos.

No 2º Capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica sobre MAREs, contendo fatores históricos, explicações das propriedades eletromagnéticas, os mecanismos de absorção e reflexão da onda eletromagnética, a teoria de multicamadas e os métodos de caracterização.

No 3º Capítulo são descritos os procedimentos experimentais para a obtenção dos compósitos e as explicações das técnicas de caracterização empregadas nos materiais escolhidos.

No 4º Capítulo são apresentados os resultados e discussões das caracterizações morfológicas, estruturais e eletromagnéticas dos compósitos de camada simples e das estruturas multicamadas.

No 5º Capítulo encontram-se as conclusões desta dissertação.

2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

2.1 Estado da arte

As primeiras pesquisas de MARE iniciaram-se por volta de 1930, pouco tempo depois da invenção do radar. Elas visavam promover a redução da seção reta radar – do inglês (*Radar Cross Section – RCS*) – de veículos aéreos, evitando que a onda do radar retornasse completamente para a antena emissora e impedindo que a aeronave fosse detectada (REJAS, 2014). Em 1936, a primeira patente de um material absorvedor foi produzida na Holanda. Era um absorvedor de um quarto de comprimento de onda ($\frac{\lambda}{4}$) do tipo ressonador, feito de negro de fumo e dióxido de titânio (SAVILLE, 2005).

Na Alemanha, durante a segunda guerra mundial, o objetivo era desenvolver um material com finalidade de camuflagem. Durante esse período, foi desenvolvido um compósito à base de borracha dopada com ferrocarbonila em pó, com espessura de 7,62 mm, que ressoava na frequência de 3 GHz. Também produziram o chamado absorvedor *Jaumann*, com a principal função de maximizar a largura de banda absorvida, obtendo um bom valor de refletividade com mínimas camadas resistivas espaçadas igualmente. As telas *Salisbury screen* e o absorvedor tipo *Jaumann*, desenvolvidas pelos cientistas W. W. Salisbury e J. Jaumann, são aplicadas em técnicas militares. Esses materiais geralmente apresentam uma camada resistiva que reflete e transmite a onda e, no caso do *Jaumann*, duas camadas ou mais. O projeto foi desenvolvido com materiais multicamadas de diferente espessura, com aproximadamente 3 polegadas. As camadas aumentam gradativamente a condutividade e, então, o coeficiente de reflexão eleva-se em relação a configuração da largura de banda com o aumento do número de camadas, diminuindo sua resistividade. Os materiais produzidos foram usados para camuflar os periscópios dos submarinos, obtendo uma redução de -20 dB sobre uma frequência de 2 à 15 GHz (KNOTT et al., 1993; PEIXOTO NETO, 2016; MUNK, 2000; LUDWIG, 1967).

Após a Segunda Guerra Mundial, foi desenvolvido absorvedores de banda larga utilizando formas geométricas pontiagudas que produziam ótima

atenuação para o material absorvedor. Nos anos 1960 e 1970, os absorvedores em forma piramidal eram utilizados para revestir câmaras anecóicas, alcançando uma atenuação de - 60 dB (SAVILLE, 2005, AHMAD, 2019).

Nos anos 1980, técnicas de otimização melhoraram o design dos absorvedores (FANTE; MCCORMACK, 1988; TOIT; CLOETE, 1989). A melhoria na largura de banda absorvida dos absorvedores *Jaumann* foi avaliada utilizando camadas de diferentes resistividades para atingir uma eficácia maior (CAO et al., 1998). A partir disso, computadores e modelos de linha de transmissão foram utilizados para calcular a refletividade dos materiais (LEDERER, 1986).

Um dos primeiros grandes projetos bem-sucedido utilizando MARE foi o caça furtivo F-117, Figura 2.1, revelado pela Força Aérea dos EUA em 1990. O segredo do caça furtivo F-117 é um material cerâmico especial capaz de aumentar a absorção dos sinais eletromagnéticos e, conseqüentemente, diminuir sua exposição aos radares inimigos (MARINHO, 2015).

Figura 2.1 - Caça furtivo F-117.



Fonte: Marinho (2015).

Dos anos 1990 ao 2000 foram desenvolvidas mais técnicas de otimização para as estruturas *Jaumann*, incluindo a melhoria dos algoritmos para cálculos das propriedades dos MARE (LEDERER, 1986; SAVILLE, 2005; AHMAD, 2019).

Atualmente, as aplicações de MARE vêm crescendo no setor civil devido ao avanço da tecnologia de telecomunicação sem fio. O avanço da tecnologia

contribuiu para que outras faixas de frequência fossem vistas com maior interesse pelos fabricantes de equipamentos eletrônicos e para os pesquisadores de MAREs. (MARINHO, 2015; HONG et al., 2015; HONGFEI et al., 2015; CAO et al., 2015; ZHANG et al., 2006).

2.2 Material Absorvedor de Radiação Eletromagnética

Os MAREs são, geralmente, materiais compósitos formados por uma matriz polimérica e um aditivo absorvedor eletromagnético. As matrizes poliméricas podem ser tanto termoplásticas como termorrígidas. Como exemplo, tem-se o silicone, a resina epóxi, o poliuretano, o polietileno, entre outros. Já os aditivos podem ser dielétricos e/ou magnéticos. Desta forma, os MAREs são classificados em duas categorias: dielétricos e magnéticos (LAX, 1962).

Os MAREs dielétricos interagem com o campo elétrico da onda eletromagnética, e esta interação está relacionada às suas propriedades dielétricas, ou seja, sua permissividade (ϵ). Materiais dielétricos, como o carbeto de silício, são usados como aditivos, mas muitos MAREs dielétricos são baseados em carbono, seja pela adição de negro de fumo, grafeno ou nanotubo de carbono. (LEE, 1991; BALCI et al., 2015; LIU et al., 2011). Isto porque aditivos de carbono aumentam a resistência mecânica e a condutividade elétrica do compósito. Porém, alguns desses MAREs, como espumas piramidais de câmaras anecóicas, são grandes e frágeis, e não podem ser usados onde há pouco espaço e muita vibração mecânica (SFALSIN, 2008).

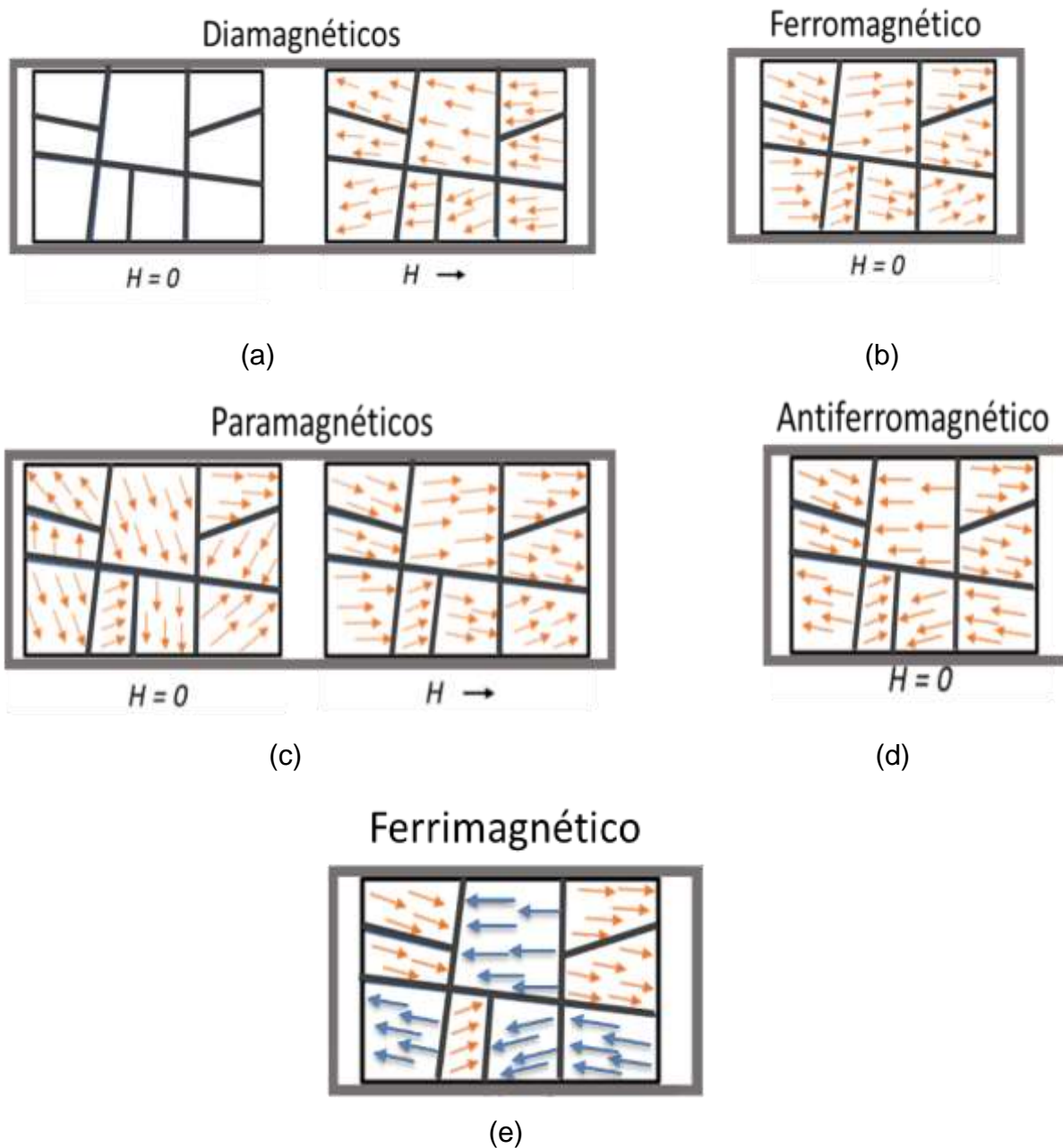
Os MAREs do tipo magnéticos também possuem permissividade, mas, além disto, interagem com o campo magnético através da permeabilidade (μ) (LAX, 1962; LEE, 1991). Eles são preparados por dispersão de aditivos eletromagnéticos, tais como as ferritas (LEE, 1991; CHO, 1996; YADOJI et al., 2003; Gama e Rezende, 2013). Estes MAREs possuem ótimas características absorvedoras, mas, como desvantagem, têm uma densidade elevada e podem oxidar, afetando sua eficiência. Para aeronaves supersônicas, por exemplo, isto pode resultar no aquecimento indevido de suas superfícies (SILVA, 2008).

Figura 2.3.a. No paramagnético, os elétrons desemparelhados geram polarização permanente, resultando em uma magnetização nula, pois os momentos magnéticos em sua configuração interna estão aleatórios e se cancelam. Com campo magnético externo nos paramagnéticos, os spins se orientam na mesma direção dos momentos magnéticos, como demonstrado na Figura 2.3.c. Os antiferromagnéticos apresentam dipolos magnéticos, mas não apresentam magnetização, pois os elétrons ficam em posições antiparalelas, causando cancelamento mútuo dos momentos magnéticos, como demonstrado na Figura 2.3.d. Esta configuração sofre polarização em direção ao campo externo aplicado. E, por fim, os ferrimagnéticos possuem estrutura antiparalelas como os antiferromagnéticos, e mais de um tipo de íon com diferentes magnitudes de momentos magnéticos, como na Figura 2.3.e (CALLISTER,1991).

Os atributos mais almejados em um MARE são espessura fina e atenuação do sinal em banda larga (LI et al., 2012). Isto pode ser conseguido através do casamento de impedância, ou seja, quando as impedâncias entre o meio e o material são próximas, já que a intensidade da reflexão e transmissão depende da diferença entre elas.

Exemplos de materiais absorvedores por casamento de impedância são as estruturas piramidais, que se estendem verticalmente à superfície com um padrão de espaçamento definido. Estes MAREs foram produzidos para realizar uma transição gradual da impedância do ar para a impedância do material, e a absorção é resultante de múltiplas reflexões entre essas pirâmides. Outro exemplo de MARE que utiliza o casamento de impedância é a estrutura multicamada, ou seja, diferentes materiais absorvedores são colocados em camadas para reduzir gradualmente a diferença de impedância entre o meio e o material mais absorvedor (AMARAL, 2018; AHMAD, 2019).

Figura 2.3 - Alinhamento dos spins (a) diamagnético, (b) ferromagnético, (c) paramagnético, (d) antiferromagnético e (e) ferrimagnético.



Fonte: Produção do autor.

Também é possível atenuar um sinal refletido através de ressonância. Este tipo de material, como o *Salisbury screen*, atenua o sinal refletido devido à distância de um múltiplo ímpar de $\frac{\lambda}{4}$ entre o material absorvedor e a placa metálica. Essa distância é, geralmente, preenchida por ar, mas também pode ser preenchida com um material com alto valor de permissividade. No *Salisbury screen*, a primeira camada reflete uma parte da onda incidente e transmite a outra parte.

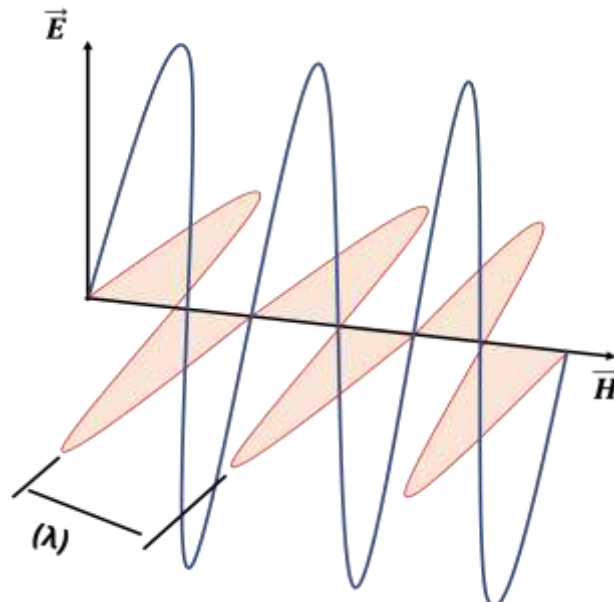
Nesta primeira reflexão, ocorre uma mudança de fase em π . Já a onda transmitida se propaga por uma distância de $\frac{\lambda}{4}$ até encontrar a placa metálica, onde acontece a segunda reflexão e, também, uma mudança de fase em π . A atenuação do sinal é dada pelo cancelamento de sinal na antena receptora devido às fases invertidas (KAUR et al., 2014).

2.3 Propagação da onda eletromagnética

Um campo eletromagnético é composto pelo campo elétrico (\vec{E}) e pelo campo magnético (\vec{H}), como representado na Figura 2.4. Quando estes campos se propagam pelo espaço livre, na velocidade da luz, têm comprimentos de onda (λ) diferentes, que variam de acordo com a frequência (f) (PEARCE, 1995).

O acoplamento entre os campos elétrico e magnético, previsto nas equações de Maxwell, implica que o campo eletromagnético se manifesta como uma perturbação que pode se propagar no espaço na forma de uma onda. Essas ondas eletromagnéticas são criadas por fontes de variação rápida no tempo (correntes e cargas), e viajam através do espaço independentemente das fontes que as produziram (NOTAROS, 2012).

Figura 2.4. Ilustração da propagação da onda eletromagnética.



Fonte: Produção do autor.

2.4 Equações de Maxwell

As equações de Maxwell descrevem o comportamento de um campo eletromagnético através de um meio. Unificadas pelo físico e matemático escocês James Clerk Maxwell, as equações em sua forma diferencial são (Amaral, 2018):

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.1)$$

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

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.3)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J} \quad (2.4)$$

onde \vec{E} é o vetor campo elétrico, em V/m; \vec{D} o vetor de densidade de fluxo elétrico, em C/m²; \vec{H} é o vetor campo magnético, em A/m; \vec{B} é o vetor de densidade de fluxo magnético, em Wb/m²; ρ é a densidade volumétrica de cargas livres, em C/m³ e; \vec{J} é o vetor densidade de corrente elétrica, em A/m².

Algumas características relevantes devem ser consideradas, sendo elas a permissividade elétrica, a permeabilidade magnética e a condutividade elétrica (σ). Se o meio for linear, homogêneo e isotrópico, ou seja, se suas características não dependem da intensidade, da posição e da orientação do campo aplicado, essas grandezas são escalares (PINHO et al., 2014):

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (2.5)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2.6)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (2.7)$$

onde a permissividade e permeabilidade do material são expressas em termos da permissividade e permeabilidade do espaço livre.

A permissividade e permeabilidade do material são diferentes do espaço livre porque o meio material é formado por átomos/moléculas carregadas elétrica e magneticamente. Desse modo, quando um campo elétrico ou magnético é

aplicado no meio material, as moléculas/átomos tendem a se alinharem ao longo do campo externo.

A constante de propagação complexa demonstra um meio com perdas, onde a interação com a onda eletromagnética resulta em dissipação de energia. O fenômeno indica defasagem da orientação dos dipolos elétricos ou magnéticos em relação à frequência da parcela do campo elétrico ou magnético da onda. Desta forma a permissividade e permeabilidade complexas são descritas como (ORFANIDIS, 2019):

$$\varepsilon = \varepsilon' - \varepsilon'' \quad (2.8)$$

$$\mu = \mu' - \mu'' \quad (2.9)$$

onde, ε' é a parcela real da permissividade que descreve os fenômenos capacitivos, ε'' é a parcela complexa da permissividade referente aos fenômenos dissipativos (FOLGUERAS et al., 2010), μ' é a componente real da permeabilidade complexa e μ'' é a componente complexa da permeabilidade complexa. Geralmente, ε'' é sempre maior que zero e muito menor que ε' (SADIKU, 2004).

Para a faixa de radiofrequência, as perdas acontecem devido a efeitos que ocorrem no interior do material. Para os materiais magnéticos, a rotação do spin atômico e magnetização dentro dos domínios são os principais mecanismos de perdas. Já para os materiais dielétricos, as perdas são consequências da condutividade do material. As propriedades eletromagnéticas desses materiais podem ser relacionadas com circuitos elétricos, onde a componente ε' equivale a um capacitor (armazenamento de energia) e ε'' um resistor (dissipação de energia). A mesma relação pode ser feita para um material magnético com perdas, onde μ' é um indutor e μ'' resistor (CALLISTER et al., 2011).

2.5 Linha de transmissão

A teoria da linha de transmissão é a junção da teoria do eletromagnetismo e da teoria de circuitos elétricos. Pode-se dizer que uma linha de transmissão é um meio condutor em que um Analisador de Rede Vetorial (*Vector Network*

Analyzer - VNA) interliga dois, ou mais, terminais. Geralmente, estes terminais são conectados através de um guia de ondas, que é responsável por canalizar a energia eletromagnética propagada (ULABY et al., 2010; HIEBEL et al., 2007).

Guias de onda são estruturas constituídas com um material metálico ao longo de um determinado eixo, já que o guia deve absorver o mínimo possível de energia (VICENTE, 2004). Sua construção apresenta algumas dificuldades, seja no caso de curvas e torções ou por requererem técnicas de corte e soldaduras especializadas (PINHO; ROCHA; FERREIRA, 2014).

Os formatos de guias de ondas podem ser diversos, dependendo da sua aplicação, mas os guias mais comuns são o retangular e o circular. Os guias de onda retangulares têm dimensões padronizadas, existindo três nomenclaturas: EIA (*Electronics Industry Association* - EUA), com designação WR; IEC (*International Electrotechnical Commission* - Europeia), com designação R e a inglesa, com designação WG. O guia é preenchido por material sem perdas de parâmetros constitutivos (ϵ , μ) e admite-se que as placas condutoras são ideais. A propagação de ondas num guia de onda, cuja secção transversal não varia com a distância longitudinal (direção do eixo dos z), é representado na Figura 2.5.a.

A menor frequência de operação no guia de onda retangular é definida pela frequência de corte (f_c), que define a frequência mínima a partir da qual um determinado modo pode ser propagado (FERREIRA, 2014). Assim, apenas um modo de propagação se faz presente, evitando a presença de modos de propagação simultâneos (BAKER-JARVIS, 1990). A frequência de corte é calculada por:

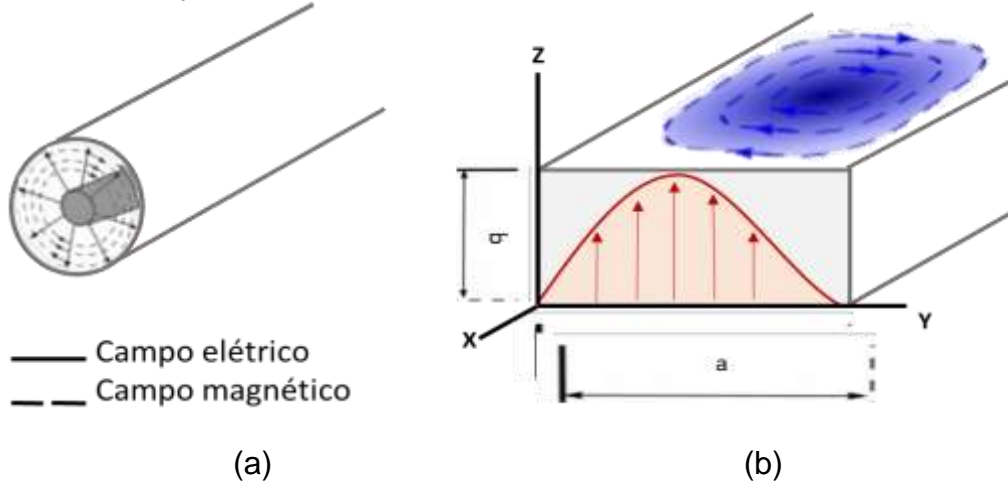
$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2} \quad (2.10)$$

onde a é a maior dimensão do guia de onda, b é a menor dimensão do guia e m e n assumem valores inteiros (0, 1, 2, ...).

Supondo $a > b$, o modo dominante do guia retangular é o TE_{10} . A frequência de corte deste modo é a menor possível nos guias retangulares. Este modo possui

a menor atenuação entre todos os modos no guia retangular e tem um campo elétrico linearmente polarizado, o que pode ser necessário em algumas aplicações. Na Figura 2.5.b está representado o modo TE_{10} de propagação da onda.

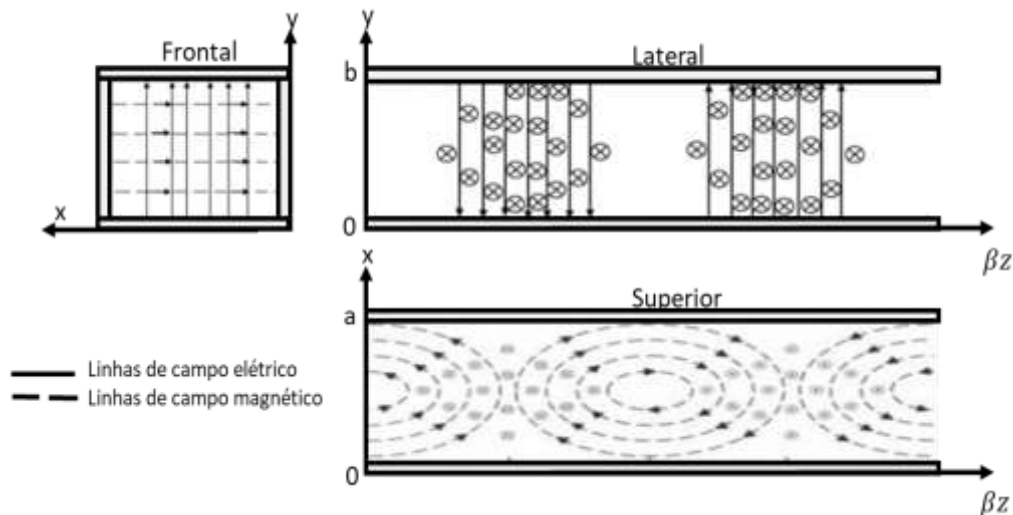
Figura 2.5 - Representação esquemática do guia de onda com modo de propagação TE_{10} da onda.



Fonte: Produção do Autor.

A Figura 2.6 mostra o comportamento das linhas de campo das seções do guia de onda retangular para o modo TE_{10} de diferentes perspectivas.

Figura 2.6 - Ilustração das linhas de campo para modo TE_{10} em guia retangular.



Fonte: Adaptada de Amaral (2015).

Na Tabela 2.1 são apresentadas as frequências de corte e as faixas de frequências das principais bandas definidas pelo IEEE. Também é apresentada

a nomenclatura EIA de cada banda e dos kits de calibração da *Keysight Technologies*.

Tabela 2.1 - Frequência de corte, frequência de operação e dimensões para guias de onda retangulares.

Banda	f_c (GHz)	Frequência de operação (GHz)	Dimensões (mm)	Kit de calibração
S	2,078	2 - 4	72,14 x 34,04	-
C	4,301	4 - 8	34,85 x 15,79	-
X	6,557	8 - 12	22,86 x 10,16	X11644A
K _u	9,488	12 - 18	15,79 x 7,89	P11644A
K	14,051	18 - 27	10,67 x 4,32	K11644A
Ka	21,077	27 - 40	7,11 x 3,18	R11644A

Fonte: Produção do Autor.

2.6 Parâmetros S

Os parâmetros de espalhamento, conhecido como parâmetros S (do inglês, *Scattering Parameters* ou *S-Parameters*), são as razões entre as energias emitida (I) e medida (R) em cada uma das portas do VNA. Em um VNA de duas portas, os parâmetros de reflexão das portas 1 e 2 são definidos por, respectivamente, S_{11} e S_{22} . O parâmetro de transmissão da porta 1 para a porta 2 é definido como S_{21} , enquanto a transmissão da porta 2 para a porta 1 é definida como S_{12} (HIEBEL, 2007). As equações dos parâmetros S são:

$$S_{11} = \frac{R_1}{I_1} \quad (2.11)$$

$$S_{21} = \frac{R_2}{I_1} \quad (2.12)$$

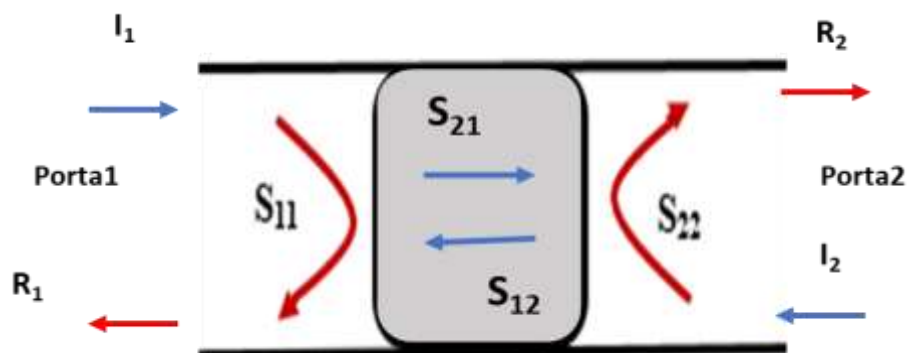
$$S_{12} = \frac{R_1}{I_2} \quad (2.13)$$

$$S_{22} = \frac{R_2}{I_2} \quad (2.14)$$

onde R_1 é o sinal medido pela porta 1, I_1 é o sinal emitido pela porta 1, R_2 é o sinal medido pela porta 2 e I_2 é o sinal emitido pela porta 2. Os parâmetros de

reflexão/transmissão, assim como os sinais emitidos e medidos pelas portas 1 e 2, são mostrados na Figura 2.7.

Figura 2.7. Sistema de reflexão/transmissão.

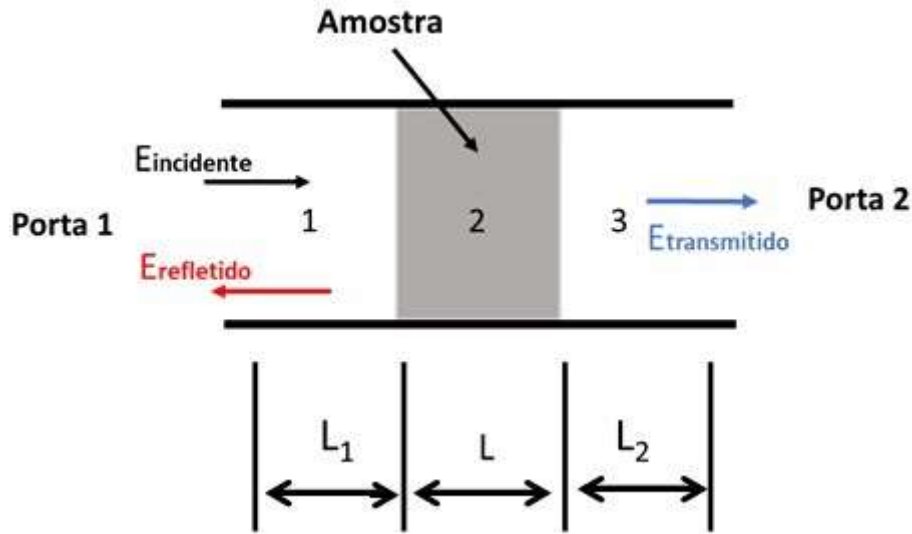


Fonte: Produção do Autor.

2.7 Obtenção dos Parâmetros com Método de Nicolson Ross Weir – NRW

O método Nicolson Ross Weir (NRW) é utilizado para encontrar a permissividade e permeabilidade de uma amostra em função dos parâmetros S. Este método utiliza os parâmetros de espalhamento medidos com o VNA, sendo baseado em medidas de reflexão (S_{11}) e transmissão (S_{21}) através de uma amostra homogênea de material isotrópico. Os valores de permissividade e permeabilidade complexos são obtidos colocando uma amostra dentro do guia de onda, que fica conectado às duas portas do VNA. A amostra interage com a onda eletromagnética emitida pela porta 1, onde o sinal refletido e transmitido será coletado, respectivamente, pelas portas 1 e 2 (BAKER-JARVIS, 1990). Através da configuração da medida NRW, a partir das regiões 1, 2 e 3, representadas na Figura 2.8, é possível obter três equações de dispersão para o campo elétrico.

Figura 2.8. Configuração da medida NRW.



Fonte: Produção do Autor.

Os campos elétricos, E_1 , E_2 e E_3 , com modo de propagação TE_{10} , dentro de um guia de onda são descritos por:

$$E_1 = e^{-\gamma_0 x} + C_1 e^{\gamma_0 x} \quad (2.15)$$

$$E_2 = C_2 e^{-\gamma x} + C_3 e^{\gamma x} \quad (2.16)$$

$$E_3 = C_4 e^{-\gamma_0 x} \quad (2.17)$$

onde C_i são as constantes determinadas pelas condições de contorno, x é a distância entre a onda incidente e o plano de referência e γ_0 e γ são dados por:

$$\gamma_0 = 2\pi j \sqrt{\frac{1}{\lambda^2} - \frac{1}{\lambda_c^2}} \quad (2.18)$$

$$\gamma = \frac{2\pi j}{\lambda} \sqrt{\varepsilon\mu - \frac{\lambda^2}{\lambda_c^2}} \quad (2.19)$$

$$\lambda_c = \frac{c}{f_c} \quad (2.20)$$

sendo γ_0 a constante de propagação da onda no vácuo, γ a constante de propagação de onda no material, $j = \sqrt{-1}$, λ o comprimento de onda, λ_c

comprimento de onda de corte do guia, f_c a frequência de corte e ϵ_0 e μ_0 a permissividade e permeabilidade do vácuo, respectivamente.

A expressão dos parâmetros S medidos em um dispositivo com duas portas pode ser obtida através das equações:

$$S_{11} = R_1^2 \frac{\Gamma(1 - T^2)}{1 - \Gamma^2 T^2} \quad (2.21)$$

$$S_{21} = R_1 R_2 \frac{\Gamma(1 - \Gamma^2)}{1 - \Gamma^2 T^2} \quad (2.22)$$

no qual R_1 e R_2 são as transformações do plano de referência em duas portas e Γ e T são, respectivamente, os coeficientes de reflexão e transmissão analíticos. Estas equações são dadas por:

$$R_1 = e^{-\gamma L_1} \quad (2.23)$$

$$R_2 = e^{-\gamma L_2} \quad (2.24)$$

$$\Gamma = \frac{\frac{\gamma_0}{\mu_0} - \frac{\gamma}{\mu}}{\frac{\gamma_0}{\mu_0} + \frac{\gamma}{\mu}} \quad (2.25)$$

$$T = e^{-\gamma L} \quad (2.26)$$

Contudo, no método NRW, os coeficientes de transmissão e reflexão são definidos em função dos parâmetros S, sendo:

$$\Gamma = K \pm \sqrt{K^2 - 1} \quad (2.27)$$

$$T = \frac{S_{11} + S_{21} - \Gamma}{1 - (S_{11} + S_{21})\Gamma} \quad (2.28)$$

Sendo K um termo dos parâmetros S, expressado por:

$$K = \frac{S_{11}^2 - S_{21}^2 + 1}{2S_{11}} \quad (2.29)$$

As equações a seguir, expressas pelos parâmetros de espalhamento S_{11} e S_{21} , são combinadas para obtenção da ϵ e μ (BAKER-JARVIS, 1990):

$$\mu = \frac{1 + \Gamma}{(1 - \Gamma) \Lambda \sqrt{\frac{1}{\lambda_0^2} - \frac{1}{\lambda_c^2}}} \quad (2.30)$$

$$\varepsilon = \frac{\lambda_0}{\mu} \left[\frac{1}{\lambda_c^2} \left[\frac{1}{2\pi L} \ln(T^{-1}) \right]^2 \right] \quad (2.31)$$

onde o termo Λ equivale a:

$$\Lambda = j \frac{L}{2\pi \ln(T^{-1})} \quad (2.32)$$

2.8 Refletividade

A refletividade é a relação entre os potenciais de energia refletida e de energia incidente no material, considerando que toda onda incidente é refletida para a porta emissora. Desta forma, é possível avaliar a capacidade do material em atenuar uma onda eletromagnética. Os valores de refletividade, também conhecido como perda por reflexão (*Reflection Loss* - RL), são calculados através da equação (WANG et al., 2011; SILVA, 2000):

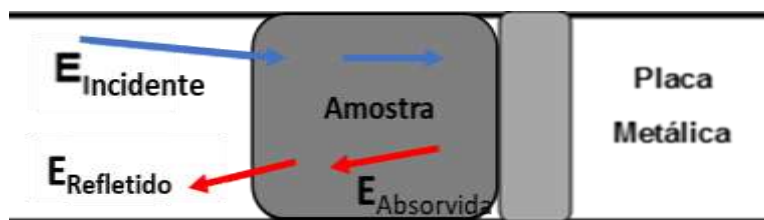
$$RL = 20 \log_{10} \left[\frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \right] \quad (2.33)$$

onde, Z_0 representa a impedância característica do vácuo e Z_{in} é dado por (LIU et al., 2014):

$$Z_{in} = Z_0 \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \tanh \left[j \left(\frac{2\pi f d}{c} \right) \sqrt{\varepsilon \mu} \right] \quad (2.34)$$

A medida experimental de refletividade é feita com uma placa metálica atrás da amostra, impedindo a transmissão da onda eletromagnética, Figura 2.9.

Figura 2.9 - Esquema representativo metálica da medida de refletividade.



Fonte: Produção do Autor.

Os valores de atenuação do sinal eletromagnético no material são dados em decibéis (dB), mas podem ser convertidos em porcentagem de atenuação usando:

$$RL_{\%} = 1 - 10^{\frac{RL_{dB}}{10}} \quad (2.35)$$

Os principais valores convertidos são apresentados na Tabela 2.2 (LIU et al., 2014).

Tabela 2.2 - Relação da refletividade em dB com a % de energia absorvida.

Atenuação em (dB)	Atenuação em (%)
0	00,00
-3	50,00
-10	90,00
-15	96,90
-20	99,00
-30	99,90
-40	99,99

Fonte: Produção do Autor.

2.9 Refletividade em multicamada

A refletividade de um material combinado em duas camadas, onde cada camada é formada por materiais diferentes, é calculada por (SILVA et al., 2000; LIU et al., 2014):

$$Z_{in} = (z_1) \frac{Z_{in_1} + Z_1 \tanh \left[j(2\pi f \frac{d_1}{c}) \sqrt{\varepsilon_1 \mu_1} \right]}{Z_1 + Z_{in_1} \tanh \left[j(2\pi f \frac{d_1}{c}) \sqrt{\varepsilon_1 \mu_1} \right]} \quad (2.36)$$

$$Z_{in_1} = Z_2 \tanh \left[j(2\pi f \frac{d_2}{c}) \sqrt{\varepsilon_2 \mu_2} \right] \quad (2.37)$$

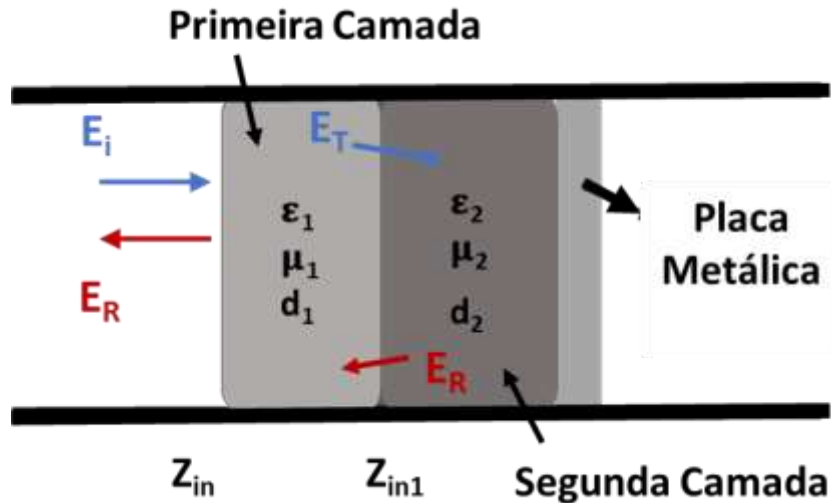
$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} = 377,76 \text{ ohms} \quad (2.38)$$

$$Z_n = \sqrt{\frac{\mu_n}{\varepsilon_n}}, \quad n = 1, 2 \quad (2.39)$$

onde Z_{in} é a impedância de entrada no espaço livre e interface de material, Z_{in1} é a impedância de entrada entre primeira e a segunda camada, Z_0 , Z_1 e Z_2 representam, respectivamente, as impedâncias características do vácuo, da primeira camada e da segunda camada, n indica qual é a camada do sistema, ϵ é a permissividade complexa relativa; μ é a permeabilidade complexa relativa; d_1 e d_2 são as espessuras de cada camada, c a velocidade da luz no espaço livre e f é a frequência da onda eletromagnética no espaço livre.

O fenômeno de redução da refletividade pode acontecer de maneira análoga à absorção de um meio material com apenas uma camada. A diferença é que o sinal incidido na combinação com mais de uma camada aumenta a interação com diferentes meios, tornando o sistema mais complexo e com maior tendência de atenuação do sinal incidido, dado que há uma diferença de impedância mais gradual entre o espaço livre e a camada mais absorvedora, Figura 2.10.

Figura 2.10 - Esquema simplificado do efeito de interação da onda com o MARE em multicamada.



Fonte: Produção do Autor.

Os absorvedores de múltiplas camadas costumam ser melhores opções para combater sistemas de radares de banda larga. No sistema multicamada, quando o sinal é transmitido, parte dele também é refletido. Assim acontece desde a primeira até a última camada na estrutura (TULEY, 2004).

Quanto maior a diferença de impedância entre o material e o espaço livre, maior a reflexão da onda incidida. Com uma maior quantidade de camadas, a reflexão é reduzida por conta da menor diferença de impedância entre as camadas. Assim, a largura de banda de um absorvedor multicamadas pode ser aumentada e/ou deslocada. (SAVILLE, 2005).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são abordados o processamento e as técnicas de caracterizações empregadas nas amostras. Entre as técnicas de caracterização abordadas estão, Difração de Raio X (DRX), Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e a Caracterização Eletromagnética.

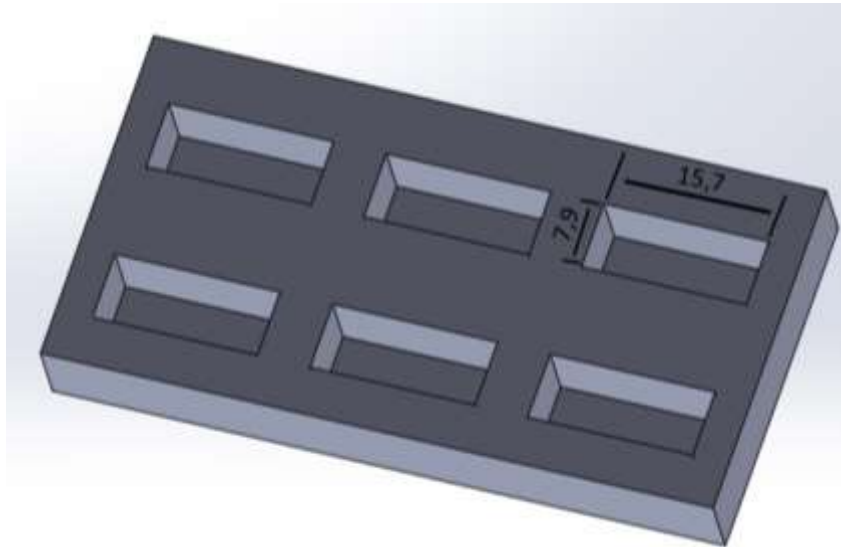
3.1 Preparação das amostras

Para o desenvolvimento deste trabalho, foram produzidos materiais compósitos utilizando como aditivo o Negro de Fumo NF XC72R da CABOT, a ferrita de Manganês Zinco da Imag Ind. e Com. de Produtos Eletrônicos e o Carbetto de Silício (SiC), gentilmente cedido pela Saint-Gobain S.A. A matriz polimérica utilizada foi o silicone comercial da marca Redelease Ltda. As frações mássicas de matriz e aditivo para cada composição foram calculadas usando:

$$\text{Matriz(g)} = \text{Aditivo (g)} * \frac{\text{Matriz}\%}{\text{Aditivo}\%} \quad (3.1)$$

Os aditivos são adicionados à matriz de silicone e misturados manualmente nas proporções descritas na Tabela 3.1. O tempo para adquirir uma homogeneidade visível na mistura é de, aproximadamente, 2 min. Após a homogeneização, é acrescentado o catalisador da marca Redelease Ltda e misturado novamente por mais 30 segundos. A quantidade de catalisador utilizado para a amostra sem aditivo é 3 m/m%, enquanto para os compósitos com aditivo a proporção é de 5 m/m%. Em seguida, a mistura é despejada no molde impresso tridimensionalmente com as dimensões da banda K_u (15,7 x 7,9 mm) e profundidades entre 1 e 6 mm, Figura 3.1. Quando a porcentagem do aditivo adicionada não permite que a mistura seja homogênea, é considerado que a mistura atingiu seu limite de saturação. A amostra quando saturada não cura totalmente, tornando impossível a análise eletromagnética.

Figura 3.1 - Molde projetado com dimensões para banda K_u .



Fonte: Produção do Autor.

As nomenclaturas dos compósitos são baseadas em suas composições, detalhadas na Tabela 3.1.

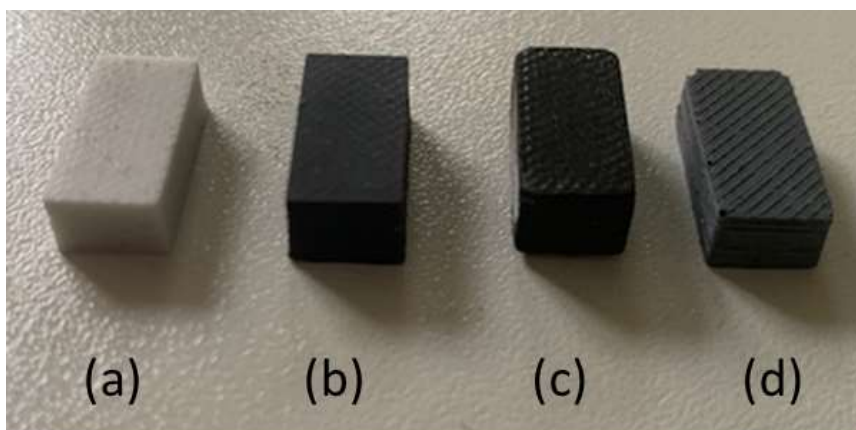
Tabela 3.1 - Nomenclatura e composição das amostras.

Nome	Matriz	Aditivo
NF1	99 m/m% de Silicone	1 m/m% de NF
NF2	98 m/m% de Silicone	2 m/m% de NF
SiC40	60 m/m% de Silicone	40 m/m% de SiC
SiC50	50 m/m% de Silicone	50 m/m% de SiC
MnZn60	40 m/m% de Silicone	60 m/m% de MnZn
MnZn70	30 m/m% de Silicone	70 m/m% de MnZn

Fonte: Produção do Autor.

Quando as amostras são retiradas do molde, elas assumem o formato retangular com as dimensões da banda K_u , onde suas espessuras variam entre 1 e 6 mm. Porém, neste tipo de processamento, é difícil garantir que a espessura exata da amostra seja um número inteiro, já que as amostras podem retrair e ficarem menores que a espessura do molde durante o processo de cura. Na Figura 3.2 são apresentadas as amostras de silicone puro e os compósitos com NF, MnZn e SiC.

Figura 3.2 - Amostras de (a) silicone puro, (b) NF, (c) MnZn e (d) SiC.



Fonte: Produção do Autor.

Na Tabela 3.2 são descritas as espessuras de cada amostra produzida, medidas cuidadosamente com um paquímetro digital.

Tabela 3.2 – Espessuras das amostras confeccionadas.

Silicone (mm)	MnZn60 (mm)	MnZn70 (mm)	NF1 (mm)	NF2 (mm)	SiC40 (mm)	SiC50 (mm)
1,08	1,00	1,00	0,96	1,08	1,10	0,84
2,00	2,00	2,19	2,06	2,10	2,00	1,97
3,09	2,90	2,96	3,02	2,99	3,02	2,94
4,10	4,27	3,97	3,95	4,10	4,00	4,05
5,00	4,51	5,20	4,96	5,00	5,02	4,70
5,96	6,00	6,10	5,98	5,96	5,97	5,53

Fonte: Produção do Autor.

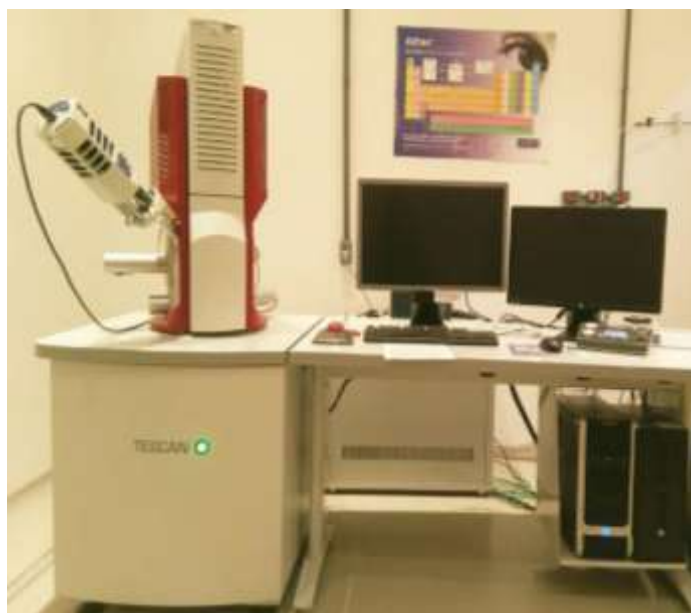
3.2 Caracterizações morfológicas e estruturais

3.2.1 Microscopia eletrônica de varredura

O microscópio eletrônico de varredura com canhão de emissão de campo (Field Emission Gun - FEG) é comumente utilizado em análise microestrutural, produzindo imagens a partir de elétrons secundários e elétrons retroespalhados. A varredura é feita em linhas paralelas à superfície de uma amostra com um feixe de elétrons, geralmente de 10 a 50 keV. Assim, quando o feixe de elétrons faz a varredura, os sinais sofrem modificações de acordo com as variações da superfície. Na varredura, os elétrons secundários

forneem imagens com alta resolução, enquanto os retroespalhados forneem informações características da composição. A forma e o tamanho da superfície de uma amostra sólida são visualizados com uma resolução superior à de um microscópio óptico, permitindo verificar detalhes de contorno de grão e de defeitos, como trincas e poros. A Figura 3.3 mostra o MEV-FEG da TESCAN–Mira 3 utilizado nas análises morfológicas dos aditivos.

Figura 3.3 - Microscópio eletrônico de varredura com *field emission gun* da TESCAN.



Fonte: Produção do Autor.

3.2.2 Difractometria de Raio X

A difração de raio X é uma técnica não destrutiva utilizada para analisar qualitativamente informações relacionadas à estrutura cristalina e às fases dos materiais. Essas informações foram coletadas com o difratômetro de raios X da marca PANalytical, série X'PertPRO, Figura 3.4, com uma tensão de 40 kV e corrente de 20 mA. Para a realização desta análise, os materiais foram levados ao difratômetro em forma de pó, e os dados foram obtidos utilizando rotação do porta amostra com passo de 0,02 s e tempo por passo de 15 s. A identificação dos picos foi feita através das fichas cristalográficas número 01-089-7555 e 00-041-1487.

Figura 3.4 - Difratômetro de raio X da PANalytical, série X'PertPRO.



Fonte: Produção do autor.

3.3 Caracterização eletromagnética

A caracterização eletromagnética das amostras foi feita com o analisador de rede vetorial, Figura 3.5, da Keysight, modelo N5232A, que opera até 50 GHz. O guia de ondas retangular (AGILENT - WR-62- P11644A), acoplado ao VNA, opera na faixa de frequência entre 12,4 – 18 GHz (banda K_u).

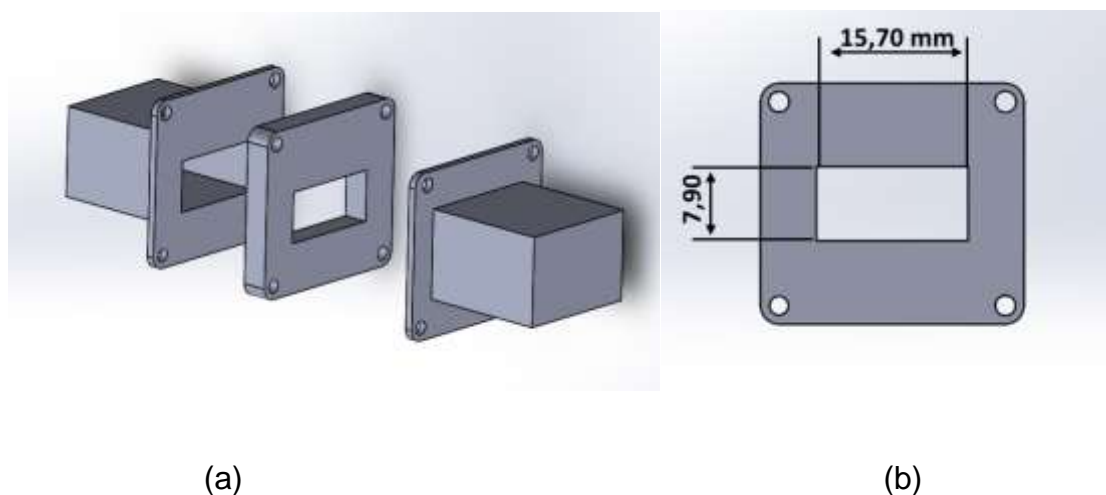
Figura 3.5 - Analisador de rede vetorial da Keysight acoplado ao guia de ondas retangular da banda K_u .



Fonte: Produção do Autor.

No guia de ondas, o *offset* é onde se posiciona as amostras para realização das medidas. A Figura 3.6 ilustra o guia de onda e *offset* em 3D.

Figura 3.6 - Representação (a) do guia de ondas retangular e das (b) dimensões do *offset* da banda Ku.



Fonte: Produção do Autor.

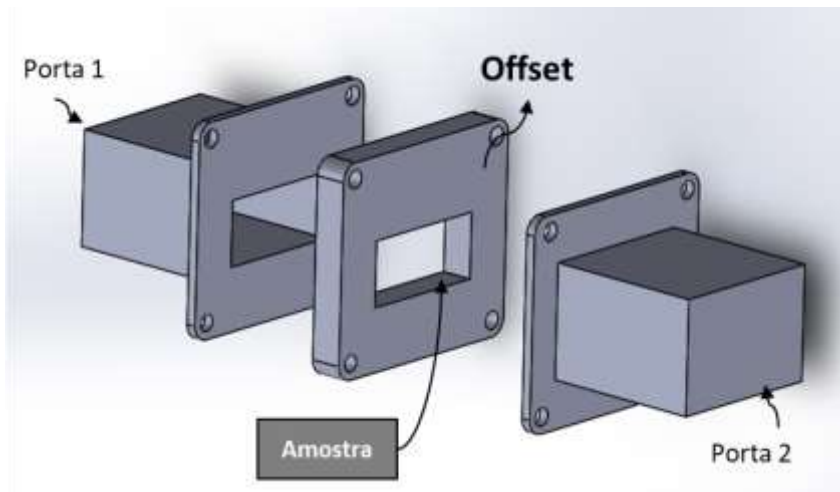
Para obtenção de bons resultados é necessário a calibração do equipamento, já que existe uma série de imperfeições, como conexões físicas, que limitam as medições (KEYSIGHT, 2012). A conexão do cabo é muito sensível e pode causar mau funcionamento se mal conectada, resultando em imprecisão nas medidas. Deste modo, sempre que houver troca de guia de ondas, ou ajustes nas conexões, uma nova calibração deve ser realizada.

Antes de realizar a calibração, o VNA é configurado para obter 1601 pontos por varredura na faixa de frequência da banda Ku. Outro parâmetro configurado é a faixa de frequência, entre 12,4 e 18 GHz. O método de calibração utilizado é o Short, Open, Load, Through (SOLT). A verificação da calibração do VNA é feita através da carta de Smith e/ou da relação de onda estacionária (*Standing Wave Ratio* – SWR). A carta de Smith apresenta características de linhas de transmissão, tais como transmissão e reflexão de ondas. A calibração é certificada ao se observar um ponto nítido e pequeno do parâmetro S_{11} em seu centro. O SWR é a razão entre a energia emitida e medida e, após a calibração, o parâmetro S_{11} deve apresentar um valor próximo de 1,00 por toda a faixa de frequência.

3.3.1 Medida de permissividade e permeabilidade

A configuração da medida de permissividade e permeabilidade no guia de onda retangular são empregadas em amostras planas, com espessuras e dimensões limitadas pelo *offset* do kit da banda de frequência utilizada. Nessa configuração, Figura 3.7, a imprecisão das medidas pode acontecer por causa da homogeneidade da amostra, da imprecisão da espessura da amostra e/ou por causa da imprecisão na distância entre a porta do VNA e a superfície da amostra. Para minimizar esses erros, a amostra é posicionada rente à porta 1, zerando o plano de referência. Os parâmetros relacionados às dimensões e distâncias são inseridos no software 85071E da Agilent, que utiliza o método NRW para calcular a permissividade e permeabilidade das amostras.

Figura 3.7 - Vista lateral interna da configuração da medida de ϵ e μ .



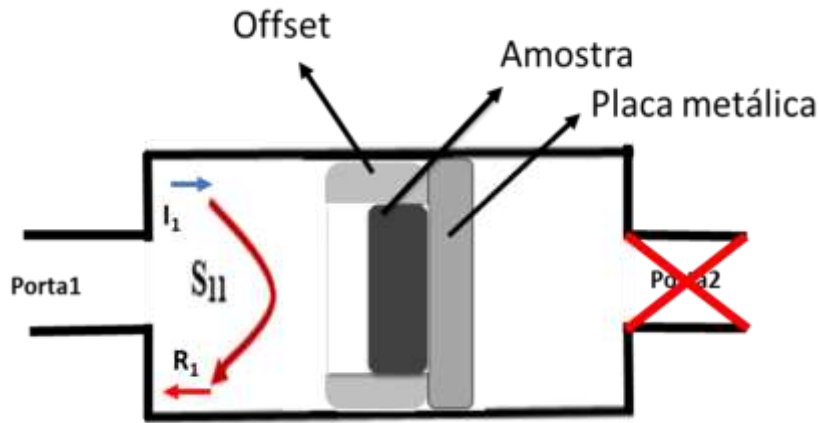
Fonte: Produção do Autor.

3.3.2 Medida de refletividade

Nas medidas de refletividade, o material de referência é uma placa metálica responsável por refletir praticamente 100% da onda emitida. Desta maneira, é possível avaliar a refletividade normal em relação a onda incidente. Quando o sinal emitido incide na amostra, uma parcela do sinal é refletida pela sua superfície e outra é transmitida. O sinal que atravessa a amostra é refletido pela placa metálica, retornando para a porta emissora, conforme a Figura 3.8. Com o sinal refletido, é possível calcular o valor do coeficiente de reflexão e

extrair do equipamento o quanto de radiação foi atenuada por conta da interação com o material.

Figura 3.8 - Vista lateral interna da configuração da medida de refletividade.



Fonte: Produção do Autor.

3.3.3 Medida de refletividade em multicamadas

Para medida de refletividade de estruturas multicamadas, as amostras são empilhadas, como demonstrado na Figura 3.9.

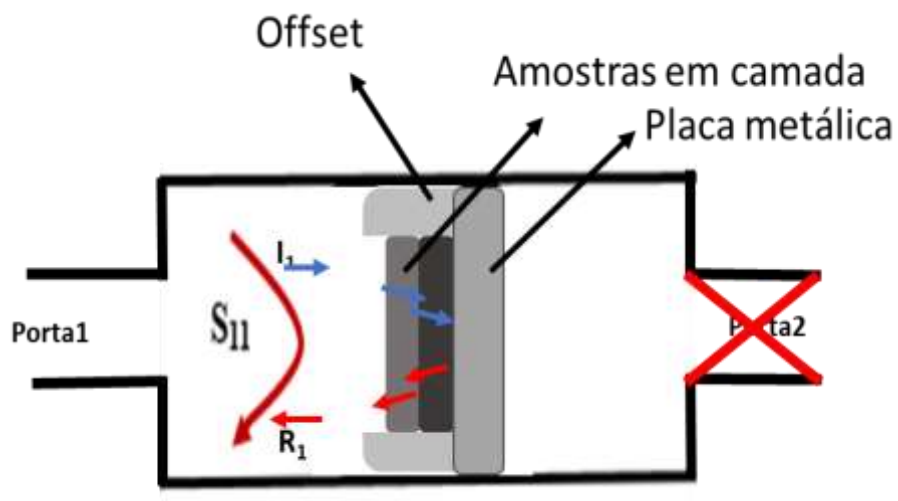
Figura 3.9 - Representação da estrutura multicamada com SiC+NF.



Fonte: Produção do Autor.

Apesar da configuração da análise de estrutura multicamada, representada na Figura 3.10, ser similar à análise de RL de amostras de camada simples, a interação da onda com os materiais é mais complexa, havendo uma reflexão e transmissão em cada camada. Como as amostras são empilhadas, uma possível fonte de erro que pode surgir é a lacuna de ar entre uma camada e outra. Essa lacuna é reduzida pressionando levemente a amostra superior na inferior antes de fixar o *offset* na porta do VNA.

Figura 3.10 - Amostra com aditivo de SiC e NF para representação da estrutura multicamada com SiC+NF.



Fonte: Produção do Autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

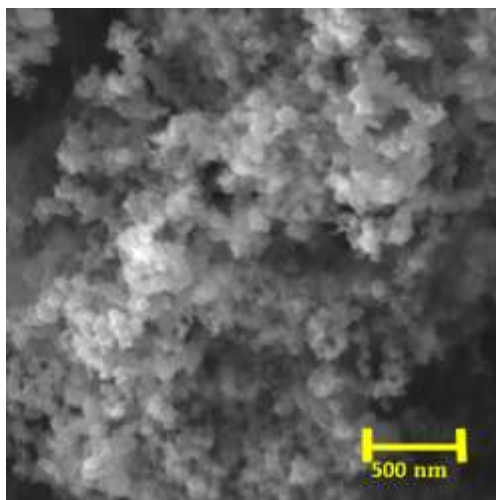
Neste tópico são apresentados os resultados de MEV-FEG e DRX em conjunto com uma discussão sobre a morfologia e estrutura de cada material. Também são apresentados os dados de permissividade, permeabilidade e refletividade, extraídos do VNA. A refletividade calculada de um material de camada única, assim como a de uma estrutura multicamada, são discutidas. Por fim, os resultados de multicamada são validados através de medidas de refletividade utilizando o VNA.

4.1 MEV-FEG

Foram avaliadas as características morfológicas, como geometria e tamanho de grão, do negro de fumo, da ferrita de manganês zinco e do carbeto de silício. Por conta da varredura com emissão de campo, foi possível produzir imagens com escala nanométrica, revelando detalhes estruturais e aglomerações de partículas.

O NF, apresentado na Figura 4.1, possui grãos em escala nanométrica, sendo possível visualizar aglomerados em formato esférico e de diferentes tamanhos.

Figura 4.1 - Imagem de MEV-FEG do NF com ampliação de 100 Kx.

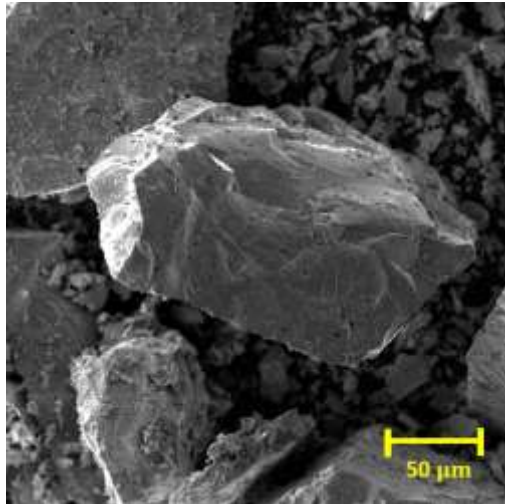


Fonte: Produção do autor.

A MnZn, Figura 4.2, possui uma melhor resolução, já que os grãos são maiores. Nela, são exibidas partículas de MnZn em formato de placas e com

tamanhos variados, pois o aditivo não foi submetido a peneiramento. Conforme mostrado na imagem, os grãos podem atingir tamanhos superiores à 50 μm .

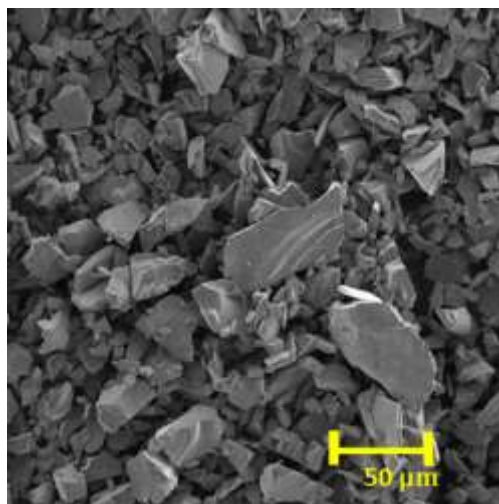
Figura 4.2 - Imagem de MEV-FEG de MnZn com ampliação de 10 Kx.



Fonte: Produção do autor.

Na Figura 4.3 são apresentadas as imagens de SiC com partículas menores que 44 μm e com formatos irregulares. O SiC apresenta partículas mais homogêneas devido ao peneiramento, feito com uma peneira de 325 mesh, que equivale a uma abertura da malha de 44 μm .

Figura 4.3 - Imagem de MEV-FEG do SiC com ampliação de 50 Kx.



Fonte: Produção do autor.

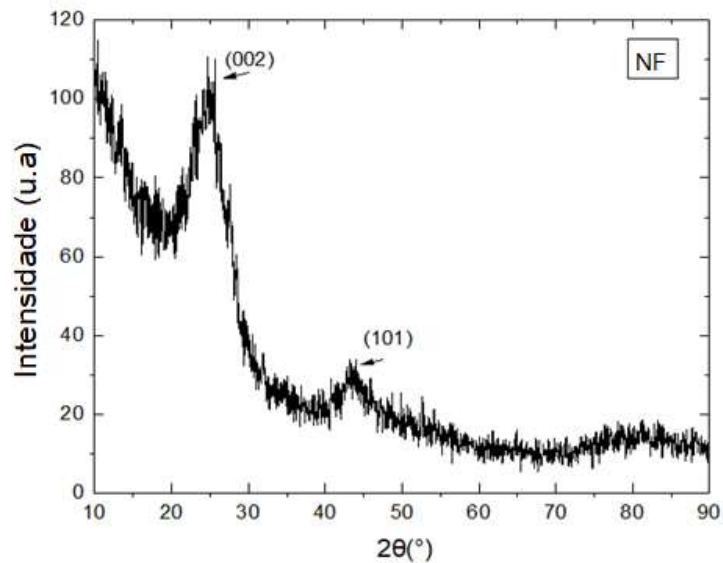
4.2 DRX

Foram analisadas as posições dos picos e os planos de cada material estudado através da técnica de DRX. As cartas de referência usadas para

comparação e análise dos materiais, apêndice A, foram: NF (00-041-1487); MnZn (01-089-7555) e; SiC (01-075-1541).

O negro de fumo possui picos de carbono amorfo em sua composição que são correspondentes aos planos (002) e (101), mostrados na Figura 4.4. O padrão do difratograma mostra dois picos distintos localizados em, aproximadamente, 25° e 44°.

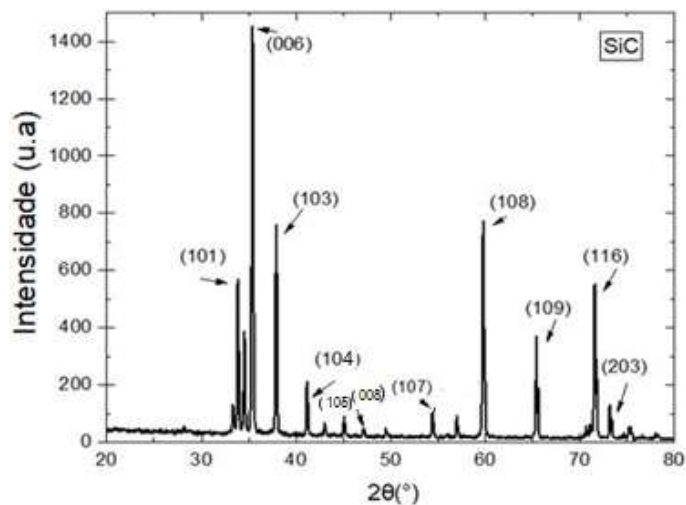
Figura 4.4 - Difratograma do NF em pó.



Fonte: Produção do autor.

O Carbetto de Silício (SiC) mostra picos bem definidos, Figura 4.5, confirmando sua estrutura cristalina hexagonal e os planos (101), (006), (103),(104),(105), (008), (107), (108), (109), (116) e (203).

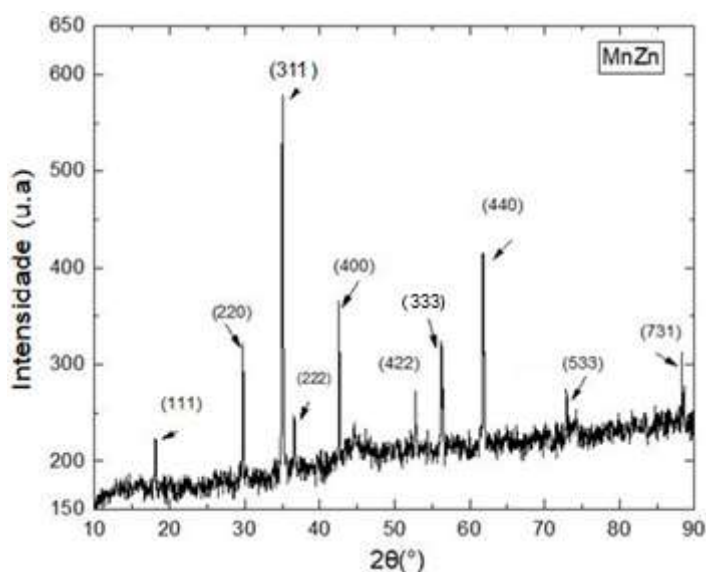
Figura 4.5 - Difratoograma do SiC em pó.



Fonte: Produção do autor.

A ferrita de manganês zinco também apresenta picos bem definidos, Figura 4.6, que confirmam sua estrutura cristalina cúbica e os planos (111), (220), (311), (222), (400), (422), (333), (440), (533) e (731).

Figura 4.6 - Difratoograma do MnZn em pó.



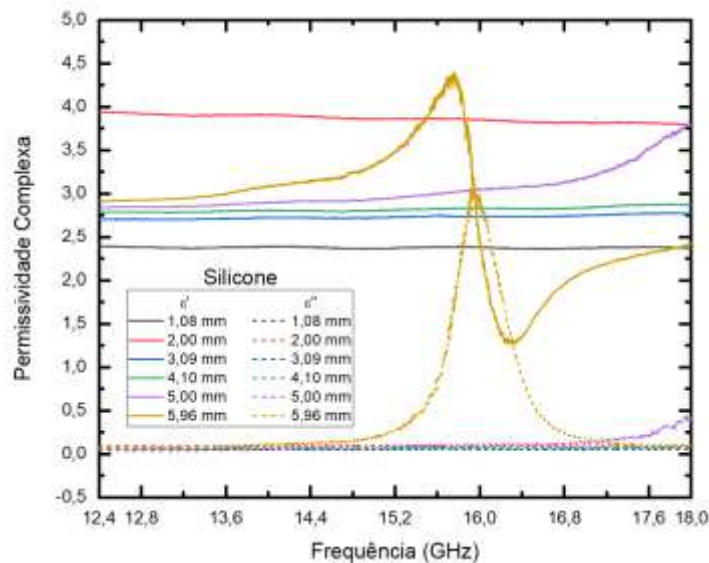
Fonte: Produção do autor.

4.3 Análise das propriedades eletromagnéticas

Inicialmente, foi caracterizado um lote de amostras de silicone sem aditivo para servir de referência, com espessuras variando entre 1,08 e 5,96 mm. Os resultados de permissividade e permeabilidade são mostrados na Figura 4.7.

As amostras entre 1,08 e 4,10 mm apresentam resultados lineares e praticamente constantes por toda a faixa de frequência, com permissividade real entre 2,4 e 3,9, permissividade imaginária em 0,1 e permeabilidade real e imaginária em, aproximadamente, 1,0 e 0,0, respectivamente. A grande diferença entre os valores de ϵ' de 1,08 e 2,00 mm pode estar relacionado à imprecisão na medida de espessura das amostras e ao seu posicionamento no *offset*, já que são as amostras mais finas e flexíveis. Outra possibilidade para esta diferença é a presença de microbolhas no interior do material, fazendo com que a sua permissividade média seja ligeiramente diferente entre uma amostra e outra. A amostra de 5,00 mm apresenta um aumento não linear da permissividade, além de uma redução na permeabilidade real e valores negativos de permeabilidade imaginária, indicando o início de uma ressonância que pode ser mais visível na próxima banda de frequência. Essa ressonância é provavelmente causada por polarização atômica ou eletrônica de materiais dielétricos sem perdas que, devido ao distanciamento da real ressonância, acaba se tornando independente da frequência ou da temperatura, mas ainda dependente da geometria (Chen et. al., 2004). A amostra de 5,96 mm apresenta o efeito dessa ressonância na banda K_u, com uma oscilação perto de 16 GHz.

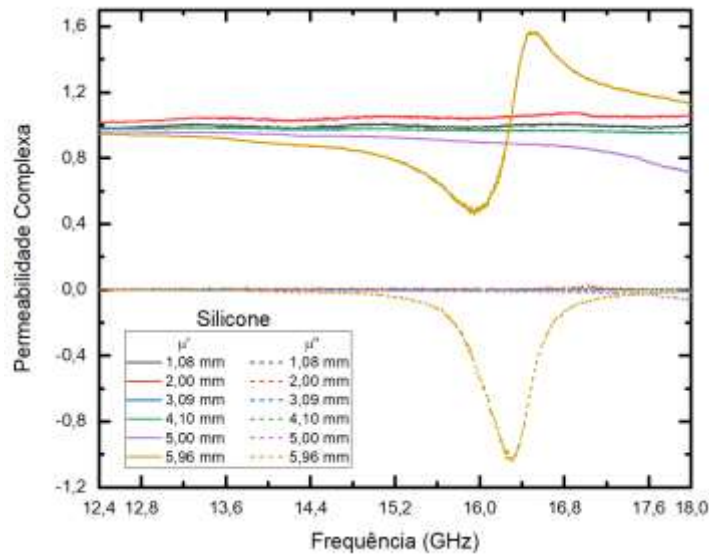
Figura 4.7 - Valores de (a) permissividade complexa e (b) permeabilidade complexa das amostras de silicone sem aditivo.



(a)

continua

Figura 4.7 - Conclusão.



(b)

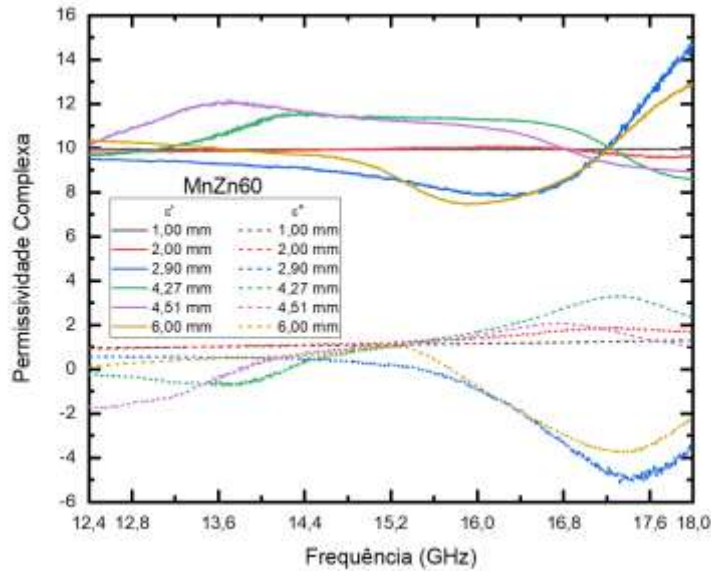
Fonte: Produção do autor.

Os primeiros conjuntos de MARE avaliados são os de MnZn. Ao contrário das amostras de silicone puro, a maioria das amostras com MnZn apresentam um comportamento não linear por toda a faixa de frequência. A alta densidade da ferrita pode favorecer tal comportamento, uma vez que a decantação do aditivo durante o processo de cura pode gerar uma pequena aglomeração e tornar o material heterogêneo. Contudo, outros efeitos também são considerados e pontualmente discutidos.

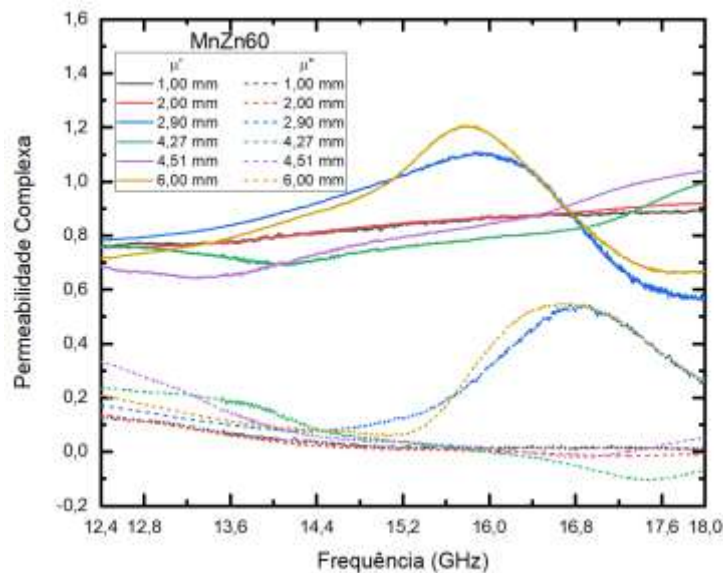
A Figura 4.8 apresenta os resultados de ϵ e μ para as amostras MnZn60. As amostras de 1,00 e 2,00 mm apresentam valores de ϵ' lineares e praticamente constantes por toda a faixa de frequência. Amostras mais espessas mostram a não-linearidade, assim como valores negativos de ϵ'' . Este tipo de comportamento em materiais com perdas, como as ferritas, é geralmente associado à relaxação dos dipolos (CHEN et al., 2004). Entretanto, devido a proporção volumétrica entre matriz e aditivo, acredita-se que essa oscilação seja similar ao efeito explicado para a amostra de silicone, ou até mesmo devido à alguma imprecisão do método NRW para calcular a permeabilidade de uma amostra em que a quantidade de material metálico envolvida é baixa, o

que poderia requisitar um método de precisão para o cálculo da permissividade (KEYSIGHT, 2006). A permeabilidade complexa também exibe essas oscilações, mas seus valores ficam próximos de $\mu' \approx 1,0$ e $\mu'' \approx 0,0$.

Figura 4.8 - Gráfico de (a) permissividade complexa e (b) de permeabilidade complexa das amostras MnZn60.



(a)



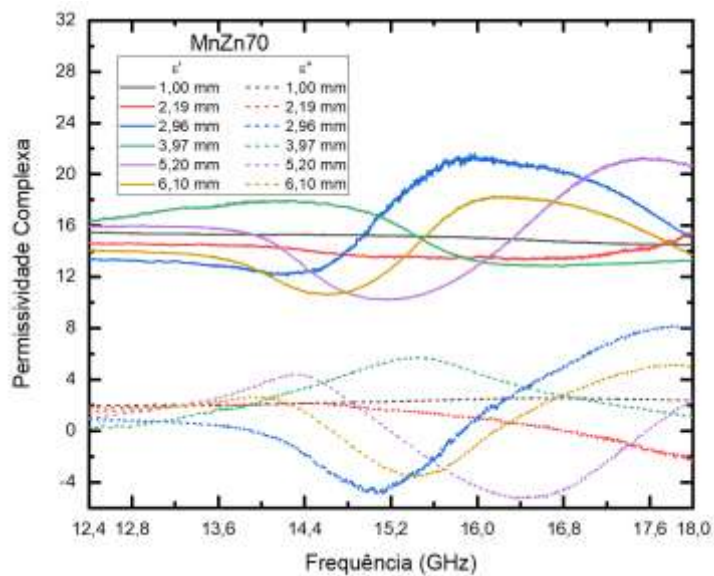
(b)

Fonte: Produção do autor.

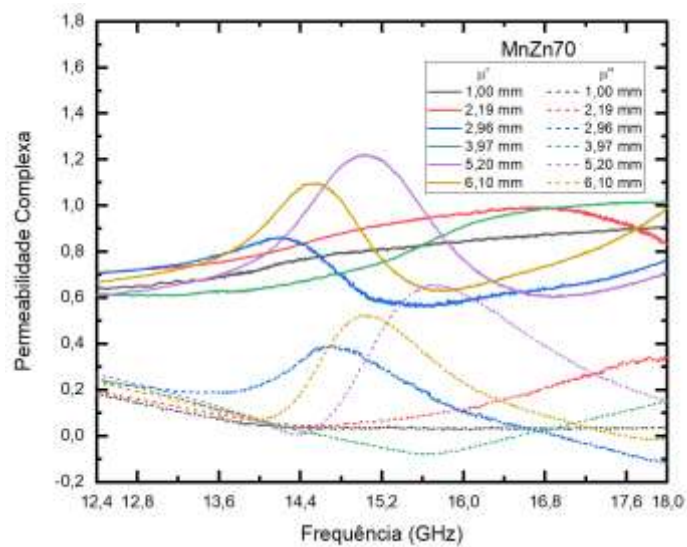
As propriedades eletromagnéticas das amostras MnZn70, Figura 4.9, são similares às anteriores. Devido à maior quantidade de aditivo, as permissividades complexas são maiores que as das amostras MnZn60. Os

valores de ϵ' ficam entre 11 e 21, enquanto os valores de ϵ'' ficam entre -6 e 6, devido às oscilações. A permeabilidade real fica próxima de 1,0 e a permeabilidade imaginária acima de 0,0. Entretanto, até mesmo amostras mais finas apresentam comportamentos não-lineares em função da frequência. A quantidade de aditivo na matriz de silicone beira o limite de saturação, indicando que a não linearidade pode estar mais relacionada à característica da ferrita do que à uma ressonância de material dielétrico sem perdas.

Figura 4.9 - Gráfico de (a) permissividade complexa e de (b) permeabilidade complexa das amostras MnZn70.



(a)



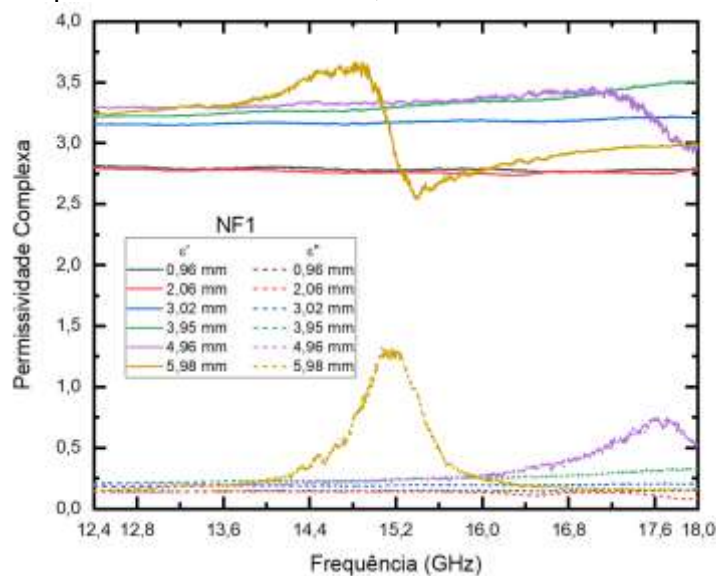
(b)

Fonte: Produção do autor.

Resultados utilizando NF apontam que o aumento da concentração do aditivo na matriz de silicone gerou um pequeno aumento na parte real da permissividade. Enquanto a amostra sem aditivo apresenta casos lineares e constantes com $\epsilon' < 3,0$, as amostras com NF apresentam casos semelhantes com valores de $\epsilon' > 3,0$.

A permissividade e permeabilidade das amostras NF1 são apresentadas na Figura 4.10. Em comparação às amostras sem aditivo, o aumento da permissividade real é muito baixo. As características de não-linearidade das amostras mais espessas (4,96 e 5,98 mm) também aparecem aqui, mas com um deslocamento em frequência. A permissividade imaginária das amostras mais espessas também apresenta valores diferentes das amostras mais finas, sendo estas mais condizentes com as propriedades de materiais dielétricos sem perdas. Com exceção das amostras de 4,96 e 5,98 mm, a permeabilidade complexa das amostras de NF1 são $\mu' \approx 1,0$ e $\mu'' \approx 0,0$.

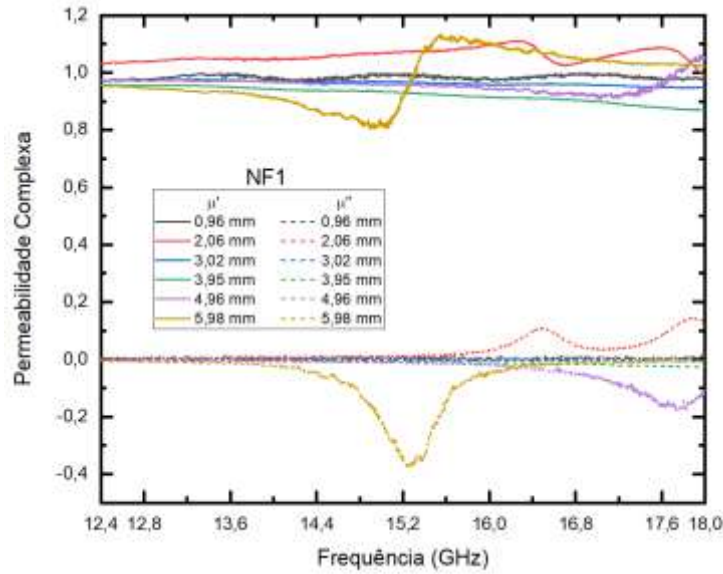
Figura 4.10 - Gráfico de (a) permissividade complexa e de (b) permeabilidade complexa das amostras de 1,0% de NF.



(a)

(continua)

Figura 4.10 Conclusão.

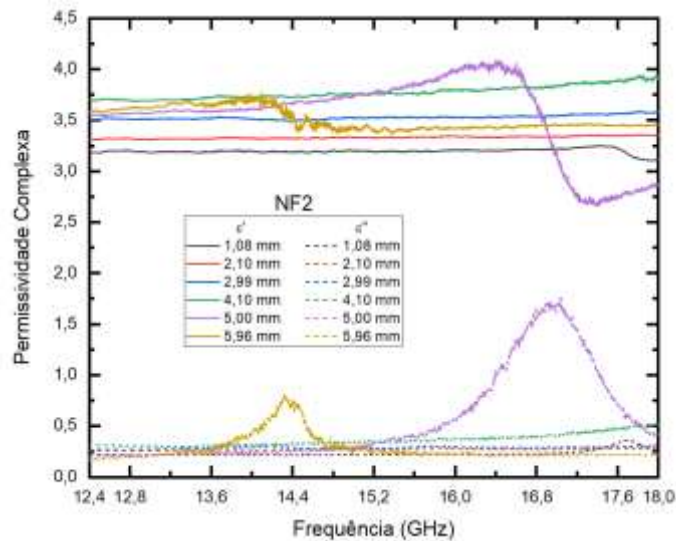


(b)

Fonte: Produção do autor.

As amostras com 2% de NF, Figura 4.11, apresentam valores de permissividade complexa maiores quando comparados às outras amostras com NF. As oscilações das amostras mais espessas também acontecem, mas são menores e estão deslocadas em frequência. Não há valores negativos para permissividade imaginária, mas há valores negativos para a permeabilidade imaginária.

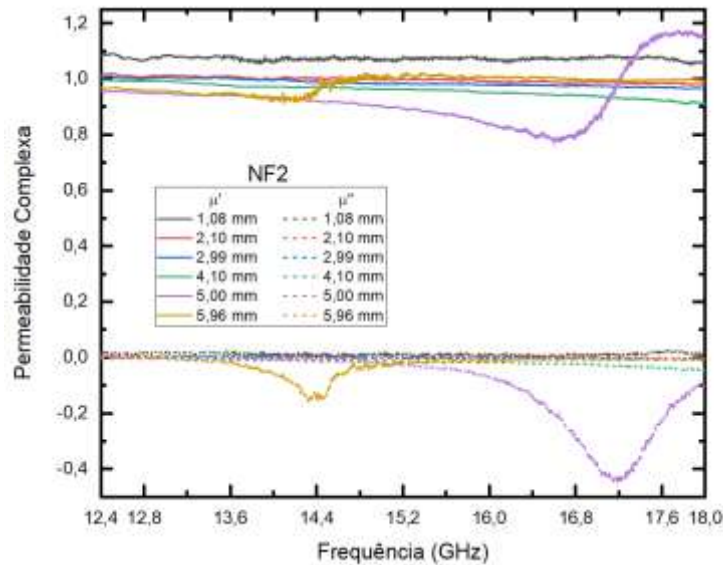
Figura 4.11 - Gráfico de (a) permissividade complexa e de (b) permeabilidade complexa das amostras de 2% de NF.



(a)

(continua)

Figura 4.11. Conclusão.



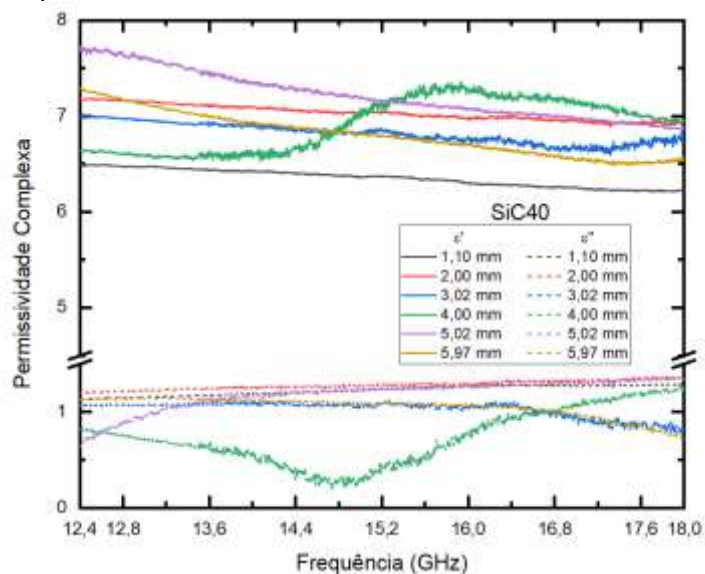
(b)

Fonte: Produção do autor.

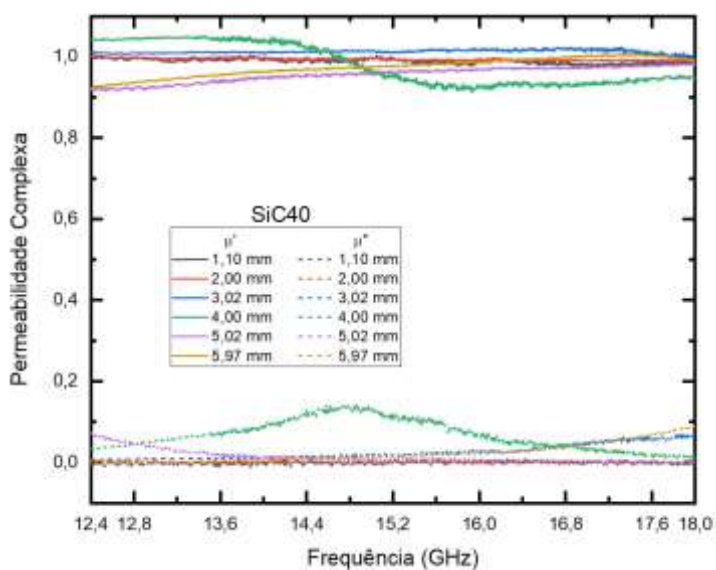
De acordo com a literatura, amostras com concentração maiores que 5 m/m% de NF apresentam mais de 90% de absorção eletromagnética (BARBA et al., 2006; JANI et al., 2017). Neste trabalho, foram utilizadas baixas concentrações de NF como aditivo devido à dificuldade de processamento manual das amostras. As amostras que foram processadas manualmente com concentrações acima de 2,5 m/m% de NF, sem nenhum processo adicional para maior dispersão do material na matriz, foram consideradas saturadas, já que as amostras não curaram e tornaram impossível a caracterização eletromagnética do material.

As amostras de SiC40 apresentam permissividade real próxima de 7,0 e imaginária próxima de 1,0. A permeabilidade complexa é coerente com a permeabilidade de materiais dielétricos, com valores $\mu'=1,0$ e $\mu''=0,0$. Os resultados são apresentados na Figura 4.12. Há uma pequena oscilação na amostra de 4,00 mm, similar às outras oscilações já discutidas para as amostras sem aditivo e com NF. A variação entre os resultados de permissividade real pode ser decorrente de imprecisões na medida da espessura, decantação do material durante o processo de cura e/ou formação de microbolhas durante a cura, alterando a permissividade média do material.

Figura 4.12 - Gráfico de (a) permissividade complexa e de (b) permeabilidade complexa das amostras de SiC40.



(a)

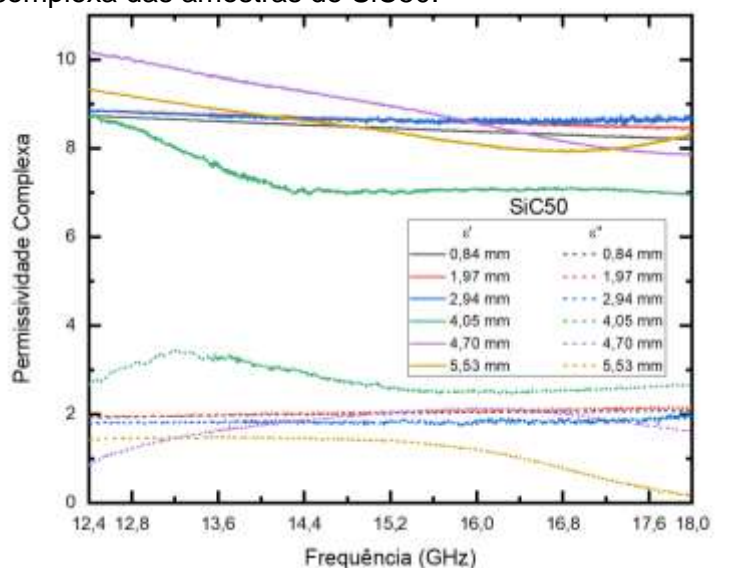


(b)

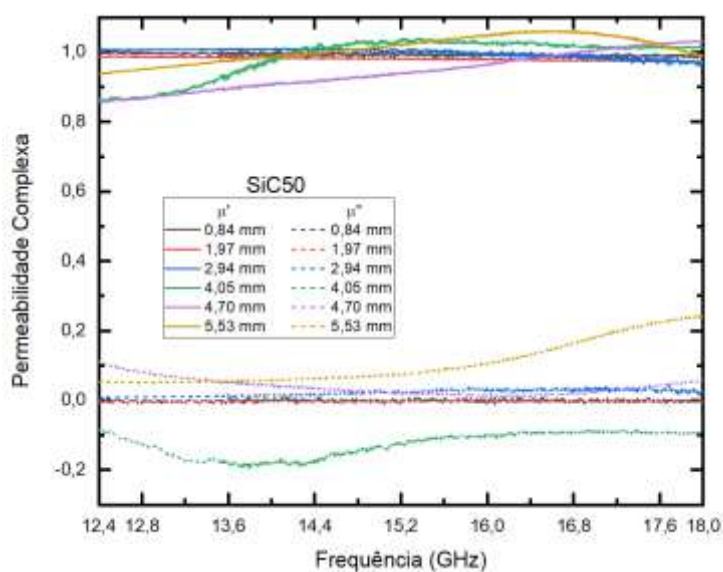
Fonte: Produção do autor.

Por fim, os resultados de SiC50, Figura 4.13, apresentam os maiores valores de permissividade complexa para compósitos dielétrico-dielétrico. A permissividade real fica entre, aproximadamente, $8,0 < \epsilon' < 10,0$. A permissividade imaginária fica próxima de 2,0 para as amostras que não apresentam oscilações pela faixa de frequência. A permeabilidade fica estável, com valores de $\mu' \approx 1,0$ e $\mu'' \approx 0,0$.

Figura 4.13 - Gráfico de (a) permissividade complexa e de (b) permeabilidade complexa das amostras de SiC50.



(a)



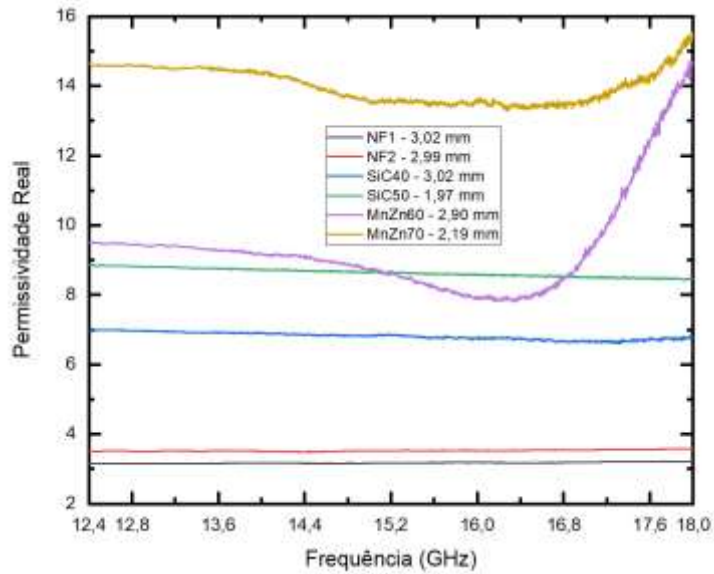
(b)

Fonte: Produção do autor.

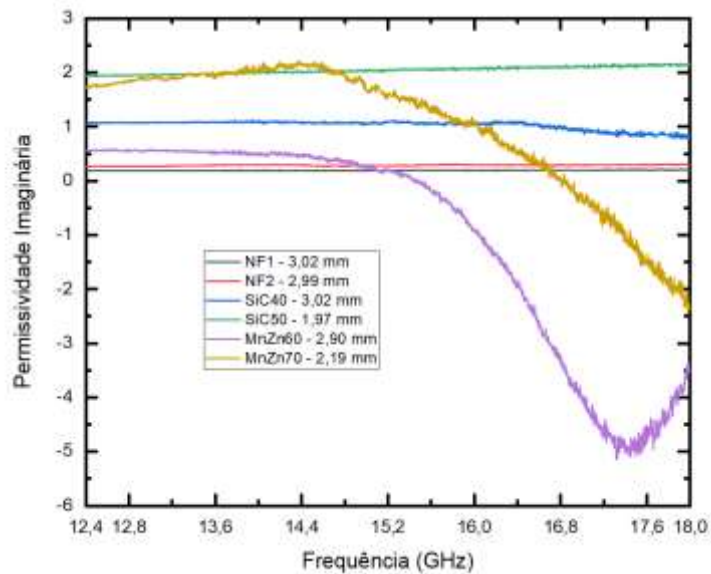
Para fins de comparação, os resultados de permissividade e permeabilidade dos materiais são apresentados na Figura 4.14. As espessuras escolhidas para cada amostra são: 3,02 mm para NF1; 2,99 mm para NF2; 2,90 mm para MnZn60; 2,19 mm para MnZn70; 3,02 mm para SiC40 e; 1,97 mm para SiC50. O critério para escolha dessas amostras foram a espessura intermediária, entre 2 – 3 mm, características superficiais das amostras e linearidade da permissividade. Nota-se que a amostra com menor ϵ' é a NF1, enquanto a com

maior ϵ' é a MnZn70. Também é possível observar que o aumento de aditivo no compósito aumenta a permissividade real, sendo está a mais afetada.

Figura 4.14 - Gráfico de (a) permissividade real, (b) permissividade imaginária, (c) permeabilidade real e (d) permeabilidade imaginária das amostras usadas para o cálculo dos gráficos 3D.



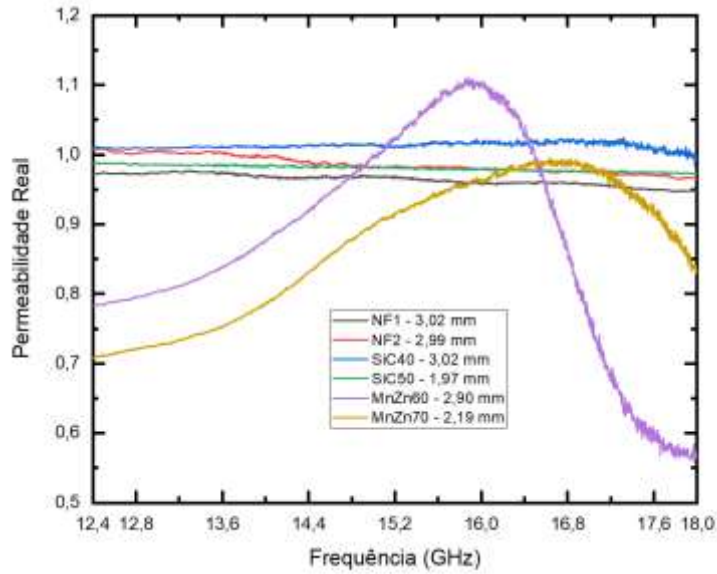
(a)



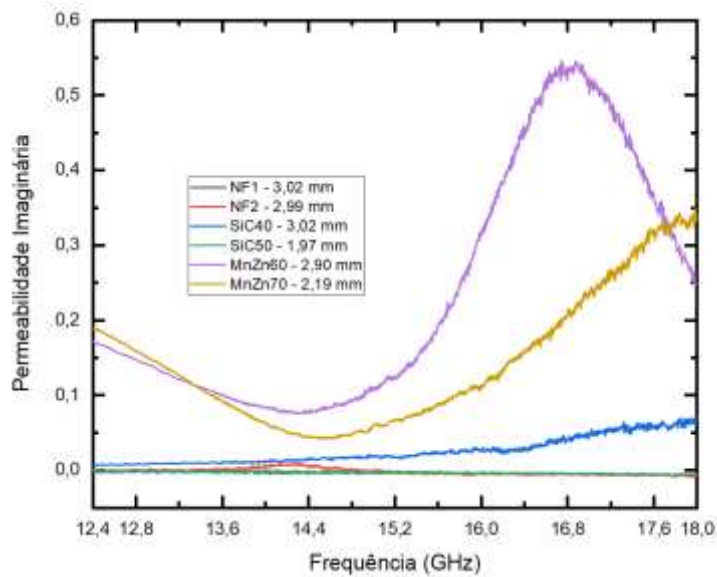
(b)

(continua)

Figura 4.14. Conclusão.



(c)



(d)

Fonte: Produção do autor.

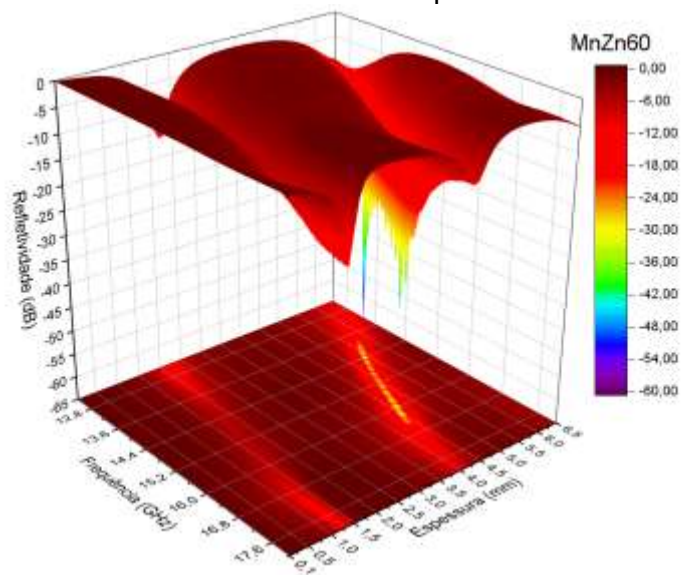
4.4 Refletividade dos compósitos

Neste capítulo, são apresentadas as refletividades experimentais e teóricas para cada amostra. As refletividades teóricas são calculadas considerando as propriedades eletromagnéticas apresentadas na Figura 4.14. Os gráficos são apresentados de forma tridimensional, onde o eixo z é a variação da espessura da amostra, que vai de 0,10 a 6,50 mm com passos de 0,10 mm. O gráfico

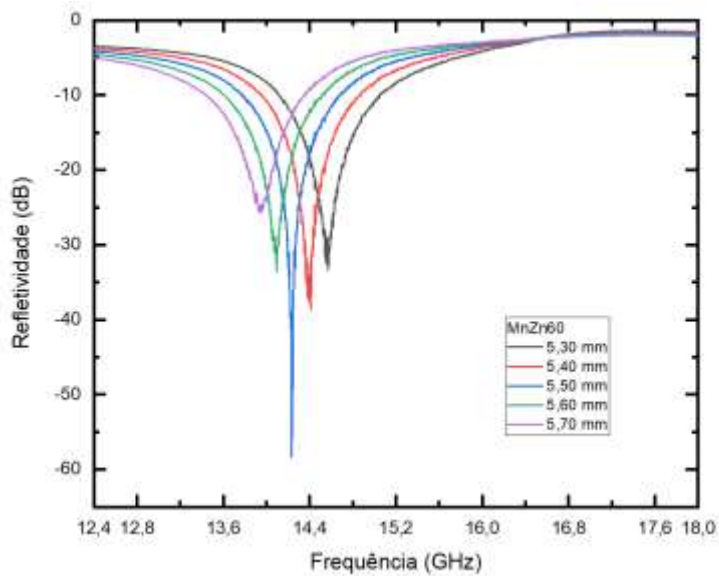
tridimensional auxilia a localização da espessura com melhor refletividade, auxiliando na escolha da espessura total da estrutura multicamada. Após a identificação da espessura onde ocorre a melhor refletividade, é realizada a avaliação experimental da amostra. Os valores experimentais são, então, comparados com os valores de refletividade recalculados, considerando a espessura e as propriedades eletromagnéticas corretas da amostra medida.

A amostra MnZn60, Figura 4.15.a, possui os melhores valores calculados de refletividade. A amostra de 5,50 mm apresenta uma atenuação de -58,39 dB em 14,23 GHz, Figura 4.15.b. Quando comparado com os resultados experimentais de refletividade, Figura 4.15.c, o resultado experimental apresenta -7,03 dB em 13,12 GHz, enquanto o calculado está com -16,48 dB em 13,57 GHz, considerando as propriedades e dimensões da amostra de 6,00 mm de espessura. A amostra usada para validação foi a de 6,00 mm pois é a mais próxima da melhor espessura encontrada no gráfico 3D, ou seja, mais próxima de 5,50 mm. O melhor valor de refletividade 3D difere da refletividade calculada por causa das propriedades e dimensões utilizadas no recálculo. Porém, pode-se verificar que, ainda assim, é possível encontrar bons resultados de refletividade através dessa estratégia. Já a diferença entre a medida experimental e a refletividade recalculada pode ser devido à alguma aglomeração de aditivo na superfície da amostra, causado por decantação durante o processo de cura. Isto faria com que a onda incidente nesta superfície fosse mais refletida, impedindo a atenuação da onda incidente no interior do material.

Figura 4.15 - Refletividade (a) tridimensional da amostra com MnZn60, (b) destaque dos melhores resultados de refletividade 3D e (c) comparação da refletividade recalculada com a experimental.



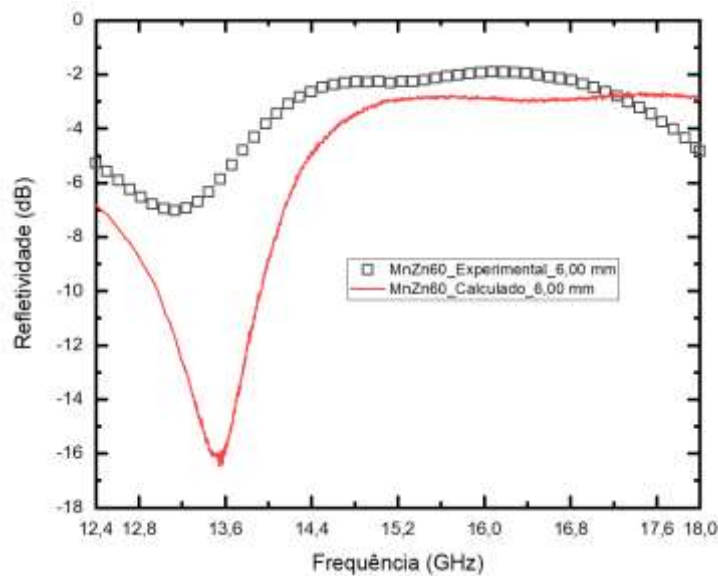
(a)



(b)

(continua)

Figura 4.15 - Conclusão.

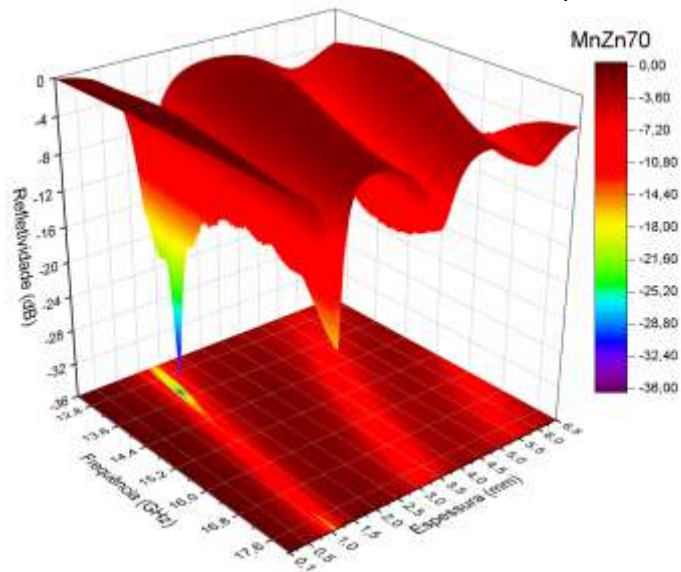


(c)

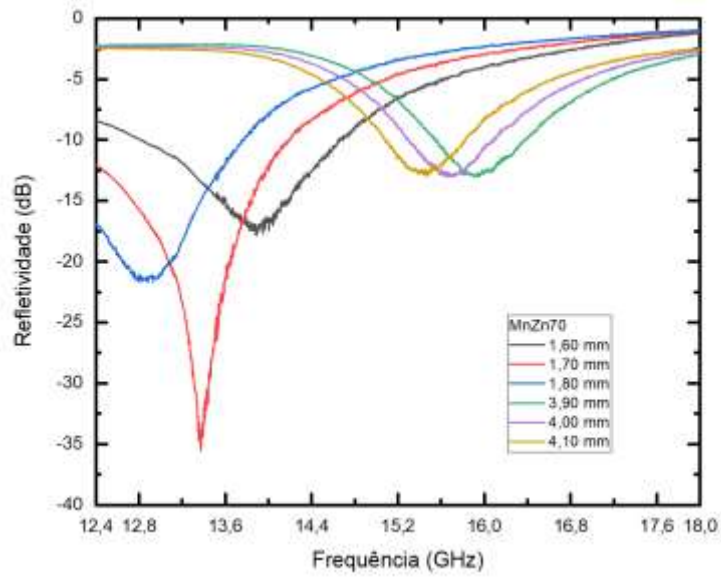
Fonte: Produção do autor.

A amostra MnZn70 é a que apresenta os melhores resultados com amostras mais finas, Figura 4.16.a. Além disto, espessuras entre 3,40 e 4,60 mm apresentam valores abaixo de -10 dB. A amostra de 1,70 mm apresenta refletividade de -35,54 dB em 13,37 GHz, enquanto o resultado mais baixo de refletividade para as amostras mais espessas é de -13,05 dB em 15,70 GHz para a amostra de 4,00 mm, Figura 4.16.b. Apesar do melhor resultado de refletividade ser da amostra com 1,70 mm de espessura, a espessura mais próxima fabricada é de 2,19 mm que não apresenta uma boa refletividade. Assim, a amostra escolhida para avaliação experimental foi a mais próxima de 4,00 mm, ou seja, a amostra de 3,97 mm. Comparando a refletividade recalculada com os resultados experimentais, Figura 4.16.c, nota-se uma diferença que pode ter sido causada pela superfície irregular da amostra em questão e/ou concentração do aditivo em uma superfície do material. O resultado experimental apresenta -6,29 dB em 15,62 GHz, enquanto o resultado recalculado apresenta -13,23 dB em 15,80 GHz. Apesar da diferença entre as refletividades, a frequência onde elas ocorrem estão relativamente próximas.

Figura 4.16 - Refletividade (a) tridimensional da amostra com MnZn70, (b) destaque dos melhores resultados de refletividade e (c) comparação da refletividade recalculada com o resultado experimental.



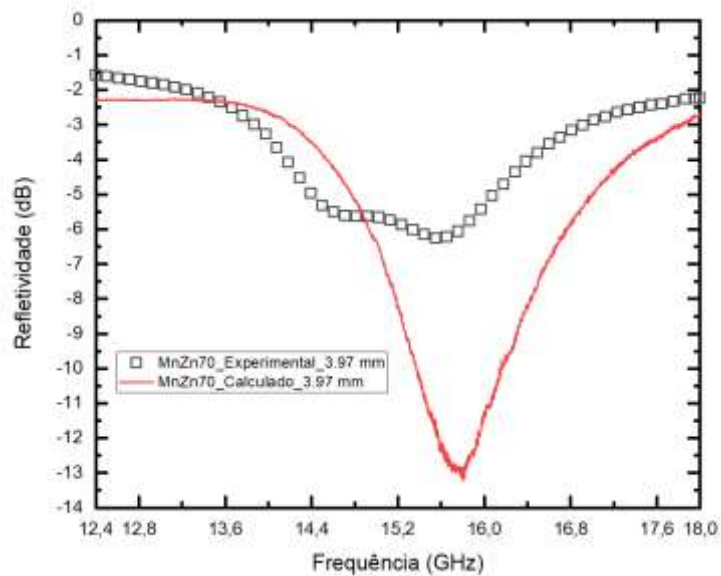
(a)



(b)

(continua)

Figura 4.16 - Conclusão.

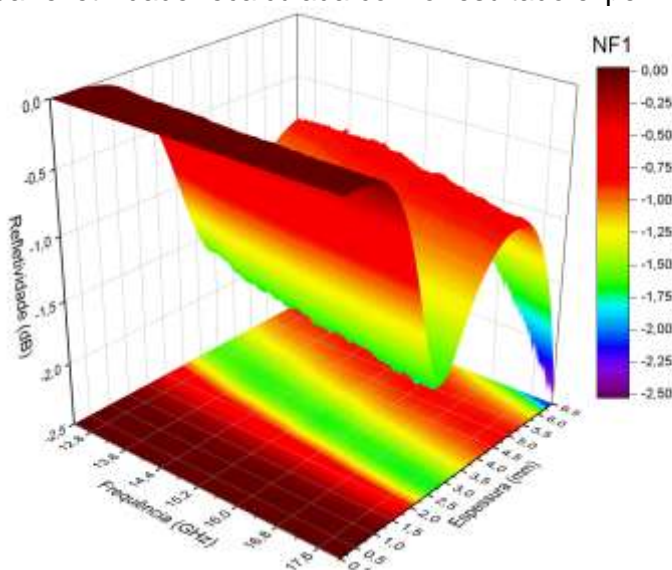


(c)

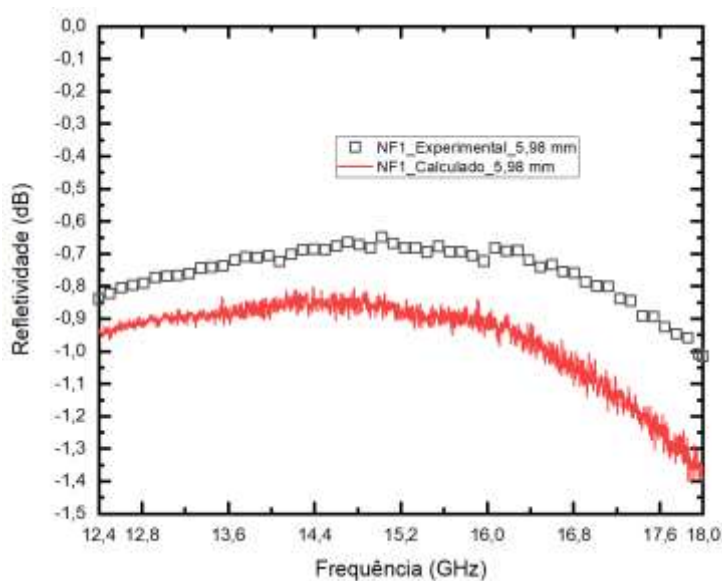
Fonte: Produção do autor.

As amostras de NF não apresentam bom potencial de absorção de radiação eletromagnética em nenhuma espessura. A começar pela amostra NF1, Figura 4.17.a, onde o melhor valor de atenuação é de -2,45 dB em 17,98 GHz, com 6,50 mm de espessura. A validação foi feita com a amostra de 5,98 mm de espessura, a amostra mais espessa que foi produzida. A refletividade recalculada está coerente com o resultado medido, Figura 4.17.b, sendo que a refletividade recalculada atinge -1,40 dB em 17,86 GHz e a medida fica em -1,02 dB em 17,99 GHz.

Figura 4.17 - Refletividade (a) tridimensional da amostra com NF1 e (b) comparação da refletividade recalculada com o resultado experimental.



(a)

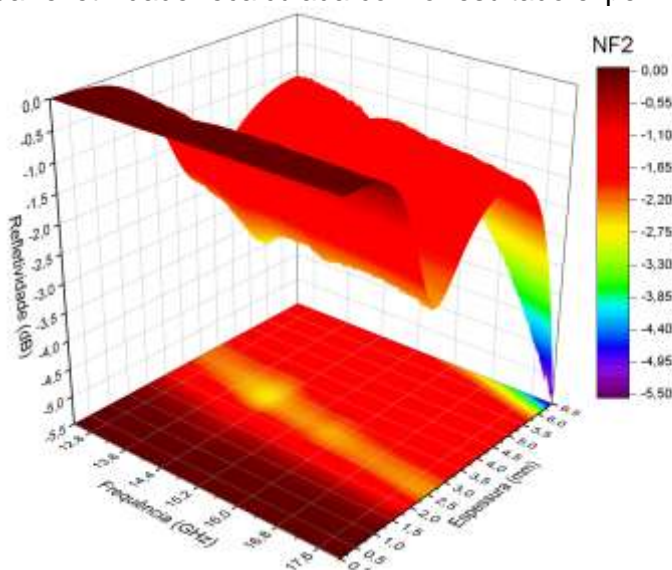


(b)

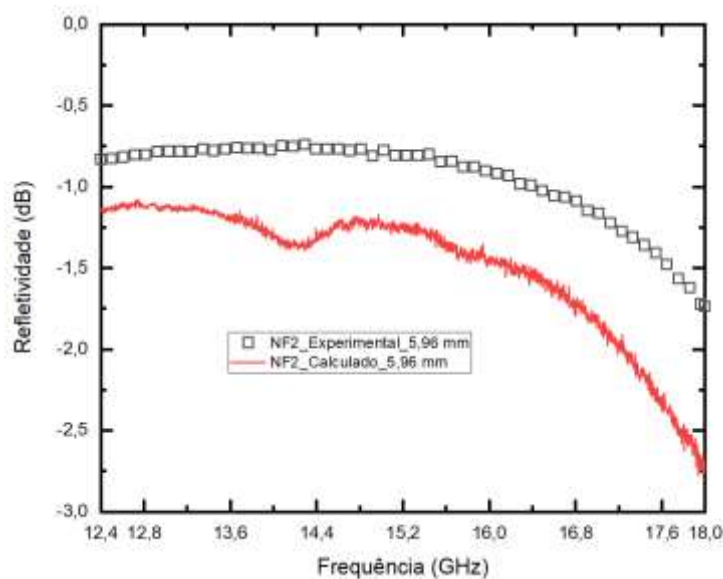
Fonte: Produção do autor.

A amostra NF2 possui atenuação máxima de -5,47 dB em 17,94 GHz, obtida com uma amostra de 6,50 mm de espessura, Figura 4.18.a. Este é o melhor resultado obtido para uma amostra utilizando NF como aditivo. O resultado experimental da amostra de 5,96 mm apresenta refletividade próxima a recalculada, Figura 4.18.b. Enquanto a refletividade recalculada ficou com -2,77 dB em 17,95 GHz, a experimental ficou em -1,75 dB em 17,99 dB.

Figura 4.18 - Refletividade (a) tridimensional da amostra com NF2 e (b) comparação da refletividade recalculada com o resultado experimental.



(a)



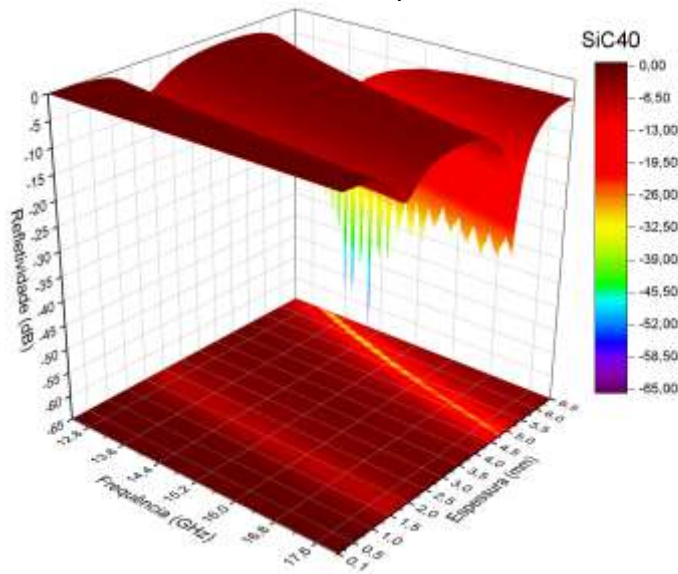
(b)

Fonte: Produção do autor.

Para as amostras SiC40, os melhores resultados de refletividade acontecem no começo da faixa de frequência, Figura 4.19.a. O melhor resultado de refletividade tridimensional é para a com 5,90 mm, onde a refletividade atinge -61,13 dB em 14,53 GHz, Figura 4.19.b. Recalculando com a espessura e as propriedades eletromagnéticas da amostra SiC40 de 5,97 mm, a refletividade atinge -55,88 dB em 14,35 GHz, Figura 4.19.c. Neste caso, a

diferença entre a refletividade tridimensional e a recalculada se justifica pelos valores de permeabilidade e permissividade utilizados nos cálculos. Quando a refletividade recalculada é comparada com o resultado experimental, que ficou em -14,96 dB em 14,89 GHz, nota-se uma pequena diferença na frequência de atenuação, mas uma grande diferença na refletividade. Essa diferença pode ser justificada pela decantação do aditivo durante o processo de cura ou até mesmo pela superfície irregular da amostra.

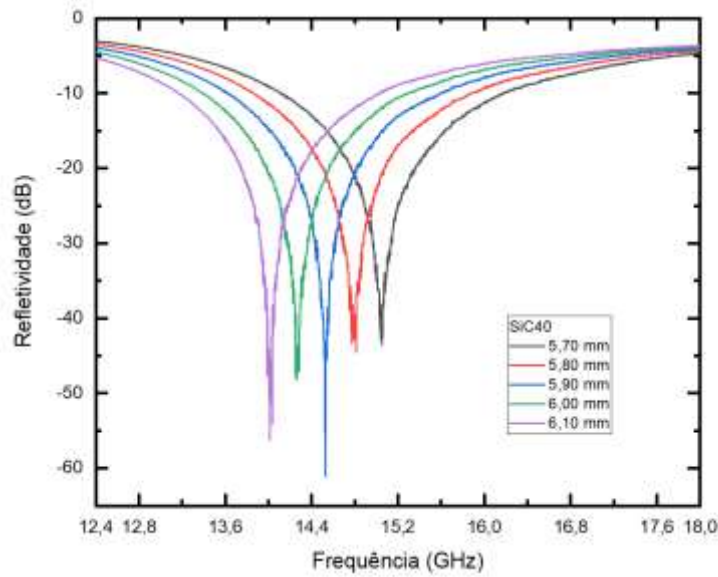
Figura 4.19. Refletividade (a) tridimensional da amostra de SiC40, (b) destaque dos melhores resultados de refletividade e (c) comparação da refletividade recalculada com o resultado experimental.



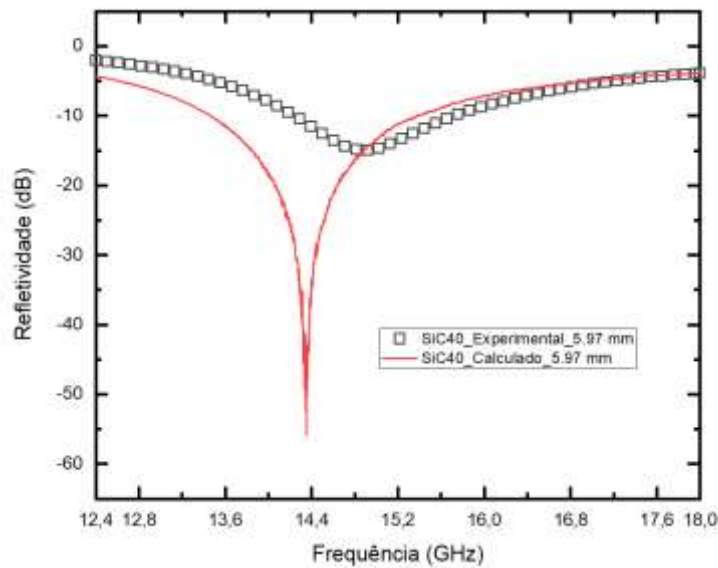
(a)

(continua)

Figura 4.19 - Conclusão.



(b)



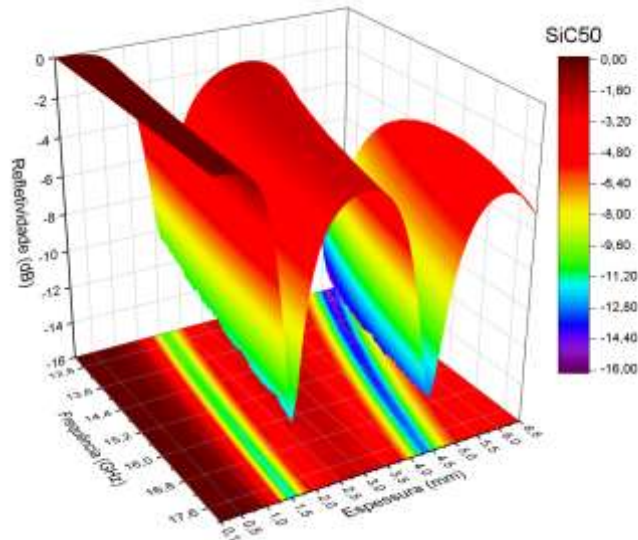
(c)

Fonte: Produção do autor.

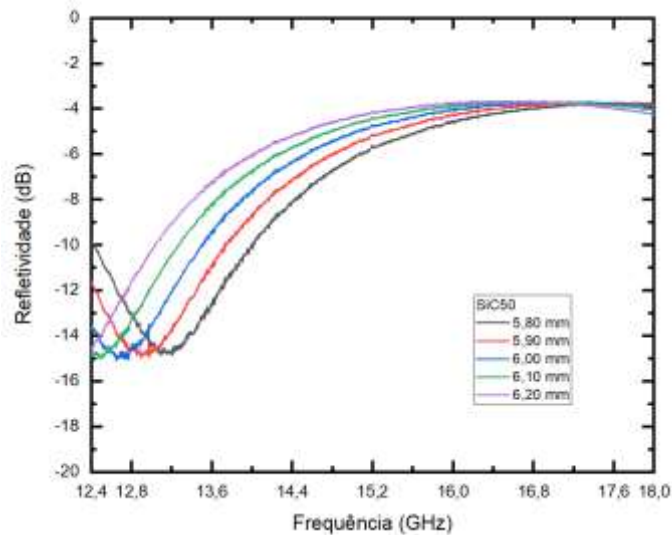
Os resultados da amostra SiC50 são apresentados na Figura 4.20. O gráfico tridimensional de refletividade, Figura 4.20.a, apresenta duas faixas de espessuras que possui valores abaixo de -10 dB, ou seja, 90% de atenuação do sinal. A primeira encontra-se entre 1,50 e 2,20 mm e a segunda entre 4,20 e 6,40 mm. Contudo, nenhum destes resultados apresentam valores calculados para a refletividade tridimensional tão bons quanto os da amostra de SiC40. O melhor resultado de refletividade tridimensional é -15,08 dB em 12,65 GHz para

a amostra com 6,00 mm, Figura 4.20.b. A amostra SiC50 com espessura mais próxima tem 5,53 dB. A refletividade recalculada fica em -14,71 dB em 13,86 GHz, enquanto que a refletividade experimental atinge -9,54 dB em 13,44 GHz, Figura 4.20.c.

Figura 4.20. Refletividade (a) tridimensional da amostra com SiC50, (b) destaque dos melhores resultados de refletividade e (c) comparação da refletividade recalculada com o resultado experimental.



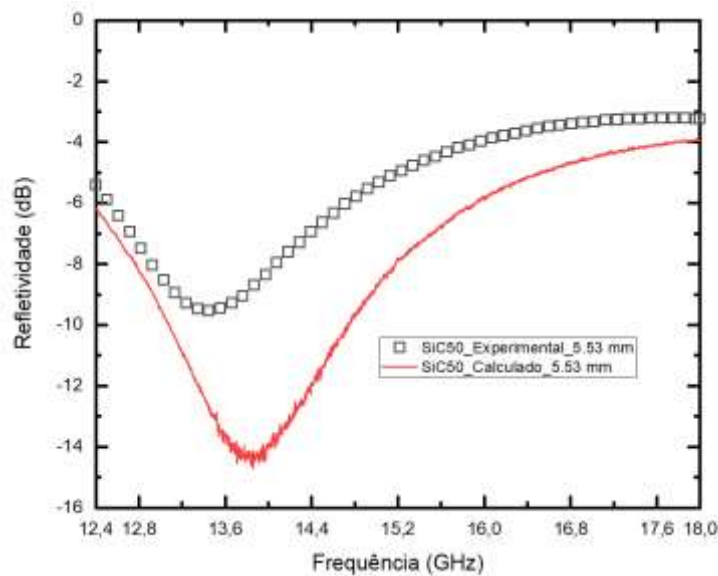
(a)



(b)

(continua)

Figura 4.20 - Conclusão.



(c)

Fonte: Produção do autor.

4.5 Refletividade multicamada

Com base nas equações multicamadas, apresentadas no Capítulo 2.9, os melhores resultados de estruturas multicamadas são os descritos a seguir. Os cálculos foram feitos utilizando Excel, onde a espessura total da estrutura multicamada foi baseada nas melhores refletividades encontradas nos gráficos 3D. A montagem da estrutura multicamadas foi feita com as amostras produzidas em laboratório, onde os materiais são colocados no guia de ondas retangular de maneira enfileirada. Para encontrar as estruturas multicamadas com os melhores resultados e validá-los, foram seguidos os seguintes passos:

1. Através dos gráficos tridimensionais, foram observadas as espessuras onde ocorrem a maior refletividade das amostras que utilizam MnZn e SiC;
2. Utilizando os mesmos parâmetros de permissividade e permeabilidade que foram utilizados para calcular os gráficos 3D, foram estudadas e selecionadas as estruturas multicamadas com a espessura próxima à do material absorvedor. Foram utilizadas as duas composições das amostras de MnZn ou SiC, enquanto para a amostra de NF foi utilizada

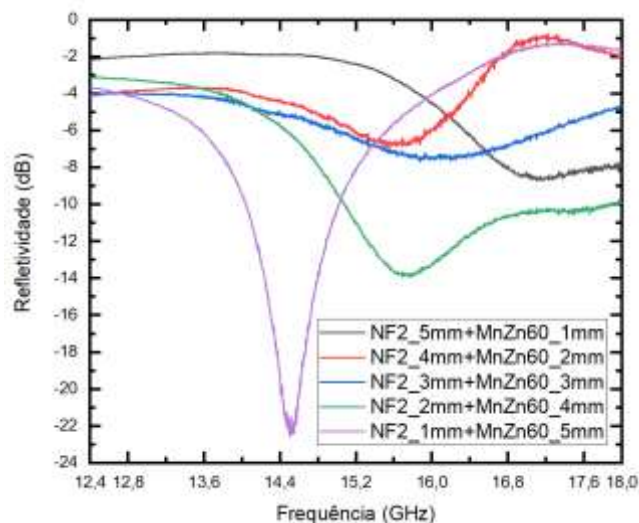
apenas a composição de 2 m/m%, já que seus valores de ϵ e μ são os que menos oscilam em função da frequência;

3. Com base no melhor resultado encontrado no passo 2, a refletividade foi recalculada com as espessuras reais das amostras produzidas em laboratório. Esses cálculos são descritos como 'calc ϵ_{3D} ' nos gráficos, pois apenas um parâmetro (a espessura) foi alterado;
4. O cálculo do passo 3 é repetido, mas agora utilizando os valores corretos de permissividade e permeabilidade das amostras com as espessuras escolhidas. Esses cálculos são descritos nos gráficos como 'calc ϵ_{corr} ';
5. A estrutura definida no passo 4 é submetida à avaliação experimental para validar os resultados, e os resultados são descritos no gráfico como 'exp'.

Desta forma, os dois primeiros passos são utilizados para localizar uma espessura onde a melhor refletividade pode ocorrer. Os passos 3 e 4 servem para mostrar o efeito que a diferença das propriedades eletromagnéticas pode causar no cálculo da refletividade. O passo 5 é a validação do resultado calculado.

A primeira estrutura investigada, possui 6,00 mm de espessura e é composta por uma camada de NF2, como a camada 1, e MnZn60, como a camada 2. A investigação da melhor combinação de espessuras entre as camadas é apresentado na Figura 4.21, no qual o resultado em destaque é a estrutura NF2_1,00mm+MnZn60_5,00mm, que atinge -22,58 dB em 14,50 GHz.

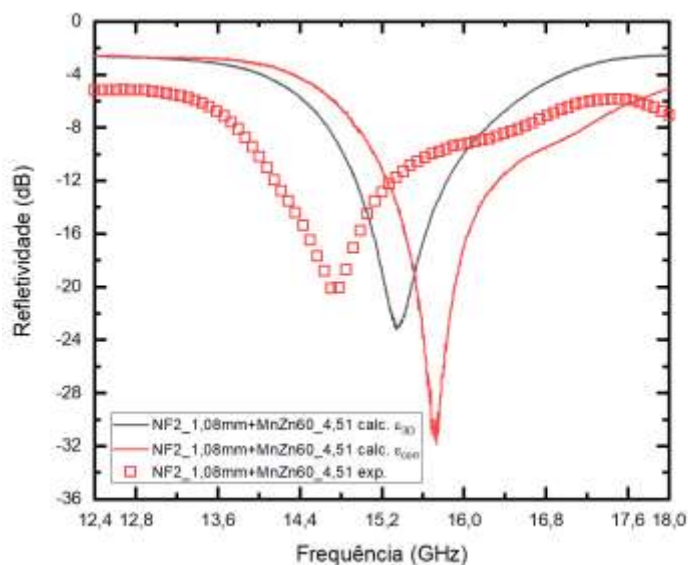
Figura 4.21 - Comparação entre os valores de RL calculado com estrutura de (NF2+MnZn60)



Fonte: Produção do autor.

Com base nas espessuras encontradas para o melhor resultado, ou seja, 1,00 mm para NF2 e 5,00 mm para MnZn60, a refletividade foi recalculada com as espessuras das amostras mais próximas, que são 1,08 mm para NF2 e 4,51 mm para MnZn60, Figura 4.22. O RL recalculado com as espessuras corretas é de -23,20 dB em 15,34 GHz, deslocando 0,84 GHz. Este efeito está relacionado não somente à espessura da amostra de MnZn60, mas também à espessura total da estrutura que, por ser menor, se desloca para frequências mais altas. Ao utilizar os valores de permissividade e permeabilidade corretos, o resultado vai para -31,91 dB em 15,74 GHz. A medida experimental desta estrutura tem valor próximo à -22,41 dB em 14,74 GHz, e apresenta um deslocamento de 0,60 GHz em relação a medida calculada com os valores corretos de ϵ e μ . A diferença entre a refletividade calculada e medida, respectivamente linha e símbolo vermelho na Figura 4.22, pode ter acontecido por conta da disposição da amostra no *offset*. Como a amostra de NF2 com 1,08 mm é muito fina, ela pode ficar inclinada ou até mesmo abaulada, tornando a espessura total da estrutura maior, deslocando o pico para frequências mais baixas.

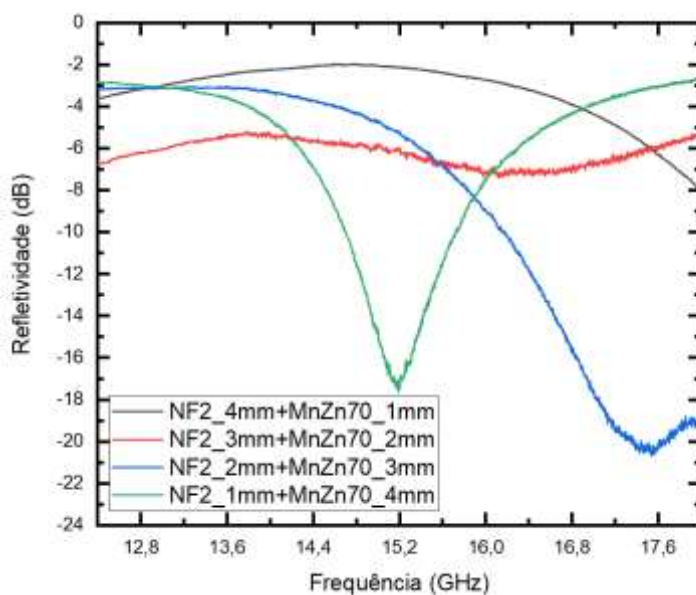
Figura 4.22 - Comparação dos valores de RL calculados com espessuras reais, características eletromagnéticas reais e medida experimental na estrutura (NF2+MnZn60).



Fonte: Produção do autor.

Na avaliação apresentada na Figura 4.23, foi explorado uma estrutura multicamada utilizando NF2 como primeira camada ainda, mas substituindo a segunda camada por MnZn70. Neste caso, a espessura total da estrutura foi definida como 5,00 mm. O melhor resultado foi a combinação NF2_2,00mm+MnZn70_3,00mm, com RL de -20,68 dB em 17,54 GHz.

Figura 4.23 - Comparação entre as os valores de RL calculado com estrutura de (NF2+MnZn70).

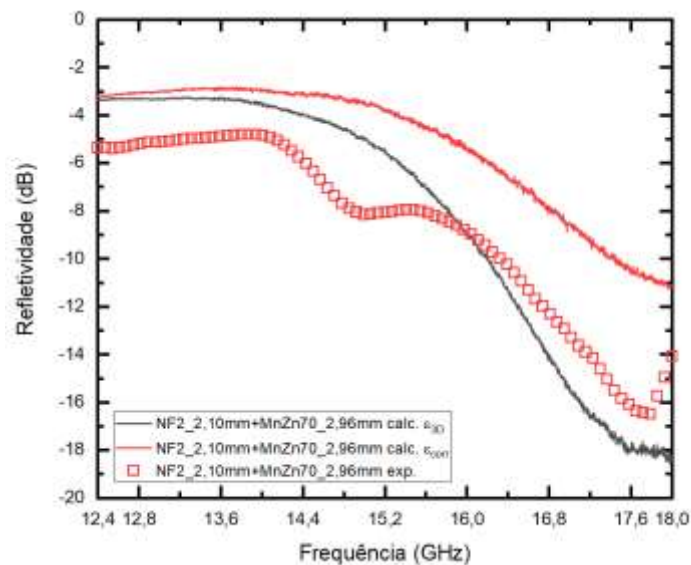


Fonte: Produção do autor.

Na Figura 4.24, foi corrigido o valor das espessuras pelo os valores reais das amostras produzidas, ou seja, foi ajustado o valor das espessuras para NF2_2,10mm+MnZn70_2,96mm. O RL da estrutura ajustada apresenta o valor de, aproximadamente, -18,61 dB em 17,98 GHz, com deslocamento de 0,44 GHz.

Recalculando com ϵ e μ de cada amostra, o valor se mantém no fim da faixa de frequência, com RL de -11,25 dB em 17,96 GHz. A medida experimental, apresenta valor de RL de -16,60 dB em 17,76 GHz, com deslocamento de 0,2 GHz em relação ao valor recalculado com ϵ e μ corretos. Essa diferença pode ser justificada pela dificuldade da obtenção exata das espessuras das amostras, feita com o paquímetro.

Figura 4.24 - Comparação dos valores de RL calculados com espessuras reais, características eletromagnéticas reais e medida experimental da estrutura (NF2+MnZn70).



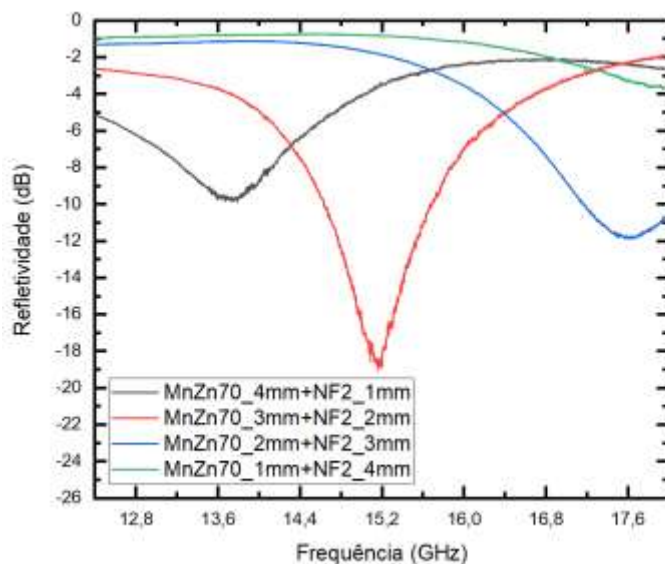
Fonte: Produção do autor.

A estrutura multicamada composta por MnZn70 possui potencial de absorção mediano, mas, por formar uma estrutura mais fina que aquela que utiliza MnZn60, torna-se interessante.

Na Figura 4.25, foi explorada a estrutura multicamada com MnZn70 na primeira camada e NF2 na segunda. Nessa estrutura multicamada, foi explorado o

equivalente ao inverso à estrutura da Figura 4.24. O melhor resultado encontrado foi a combinação MnZn70_3,00mm+NF2_2,00mm, apresentado na Figura 4.25 com valor de RL de, aproximadamente, -19,07 dB em 15,17 GHz.

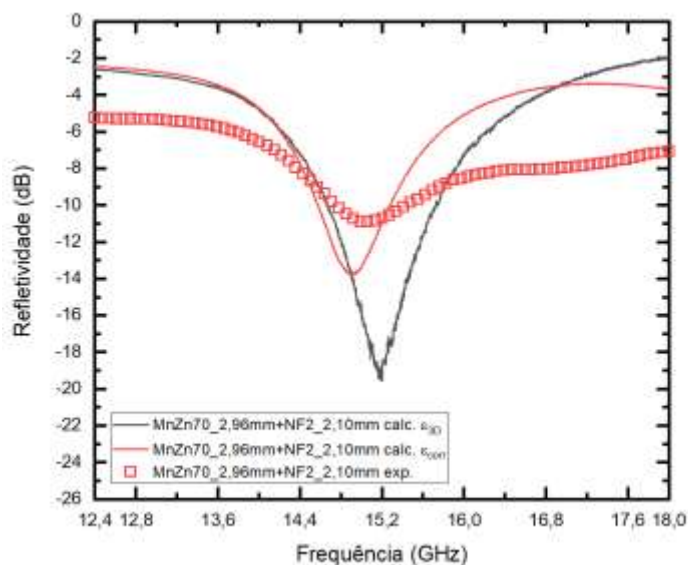
Figura 4.25 - Comparação entre os valores de RL calculado com estrutura de (MnZn70+NF2).



Fonte: Produção do autor.

As amostras com espessuras mais próximas são idênticas às da análise anterior, ou seja, 2,96 mm para MnZn70 e 2,10 mm para NF2. Com a correção da espessura, o resultado recalculado fica em -19,56 dB em 15,19 GHz, Figura 4.26. O principal motivo da diferença entre este resultado e o anterior é o ruído que provém das casas decimais dos cálculos. Com os valores corretos de ϵ e μ , o RL apresenta -13,84 dB em 14,90 GHz, deslocando 0,29 GHz para frequências mais baixas. Na validação experimental, o RL apresenta -10,93 dB em 15,09 GHz. A diferença 0,19 GHz entre a refletividade recalculada e a experimental pode ser justificada pela dificuldade de aquisição de valores exato das espessuras. Em relação à intensidade, a diferença pode ter acontecido devido as condições do ambiente, a disposição das amostras no *offset* e/ou por causa da superfície irregular das amostras.

Figura 4.26 - Comparação dos valores de RL calculados com espessuras reais, características eletromagnéticas reais e medida experimental (MnZn70+NF2).

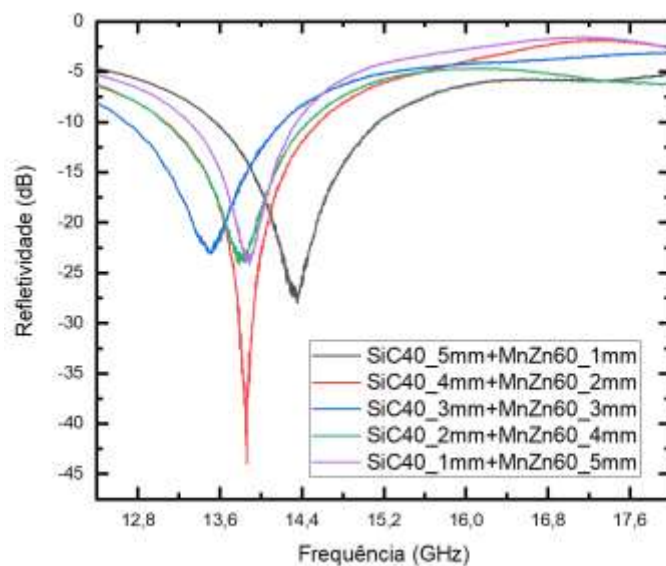


Fonte: Produção do autor.

Com a inversão das amostras, que agora possui um material com maior permissividade na primeira camada, o efeito de atenuação assemelha-se à uma estrutura *Salisbury screen* ou Jaumann, no qual a camada resistiva procede de uma distância de ar. Aqui, no caso, o material com menor permissividade substitui a camada de ar das estruturas citadas como exemplo.

Para explorar estruturas com amostras mais absorvedoras, a amostra de NF foi substituída pelas amostras de SiC. A primeira estrutura explorada foi com SIC40 na primeira camada, MnZn60 na segunda camada e espessura total de 6,00 mm, Figura 4.27. O melhor resultado foi a estrutura SIC40_4,00mm+MnZn60_2,00mm, com valor de aproximadamente -44,02 dB em 13,86 GHz.

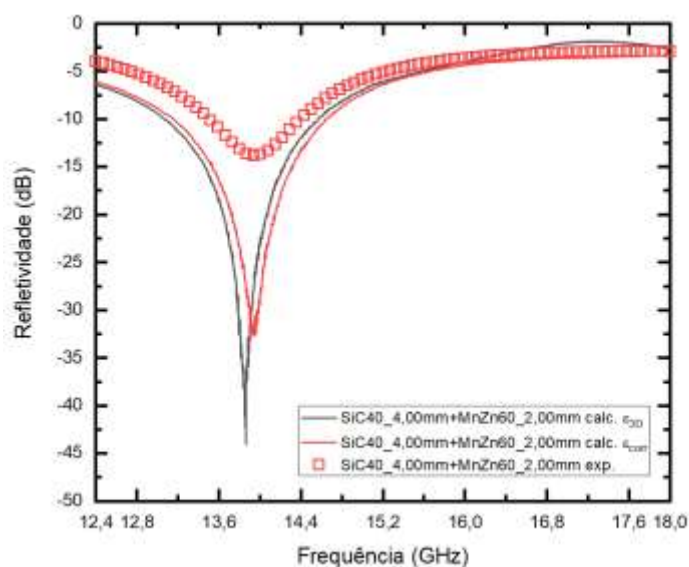
Figura 4.27 - Comparação entre os os valores de RL calculado com estrutura de (SiC40+MnZn60)



Fonte: Produção do autor.

A refletividade da estrutura escolhida é idêntica à refletividade com os valores ajustados, já que há amostras com as espessuras de 4,00 mm para SiC40 e 2,00 mm para NF2. Assim, a refletividade de -44,02 dB em 13,86 GHz se repete na Figura 4.28. Ao utilizar os valores corretos de ϵ e μ , a refletividade chega em -33,02 dB em 13,91 GHz. Aqui, nota-se o efeito que a permissividade e permeabilidade tem sobre a refletividade, afetando tanto a intensidade da atenuação como a frequência em que ela ocorre. O valor da medida experimental fica em -13,88 dB em 13,95 GHz, sendo a menor diferença em frequência ao comparar um resultado calculado com um experimental. Contudo, a atenuação do sinal medida é bem menor do que a calculada, que pode ter ocorrido por conta de algum efeito de superfície, como irregularidade na amostra ou decantação do aditivo durante o processo de cura.

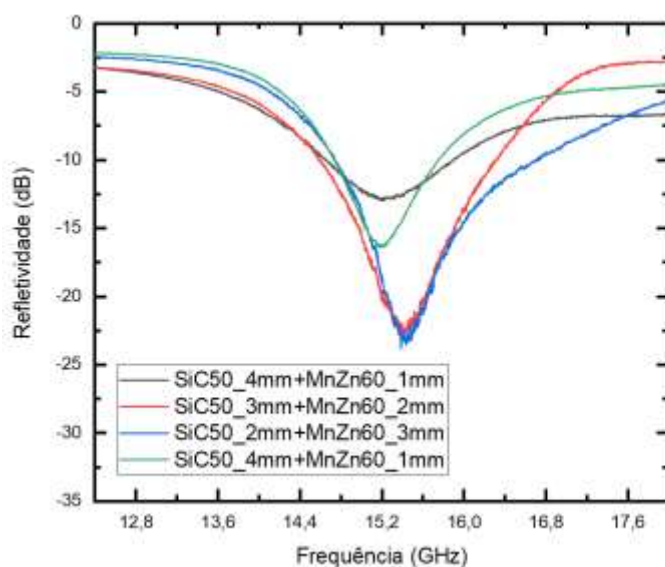
Figura 4.28 - Comparação dos valores de RL calculados com espessuras reais, características eletromagnéticas reais e medida experimental da estrutura de (SiC40+MnZn60).



Fonte: Produção do autor.

Substituindo a amostra de SiC40 por SiC50, os valores de refletividade ficam menores. Porém, a espessura da estrutura também é menor, sendo de 5,00 mm no total. A refletividade investigada foi da estrutura SiC50_2,00mm+MnZn60_3,00mm, que resultou em um valor mínimo de -23,84 dB em 15,39 GHz, Figura 4.29.

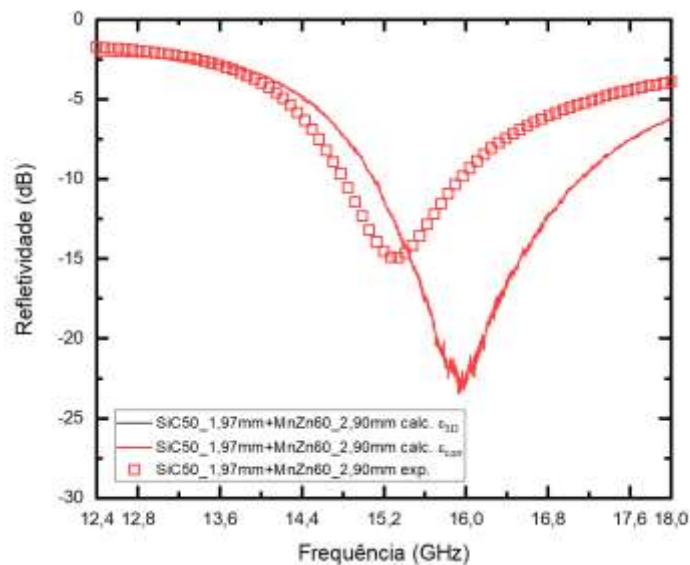
Figura 4.29 - Comparação entre os valores de RL calculado com estrutura de (SiC50+MnZn60).



Fonte: Produção do autor.

Com base no melhor resultado apresentado na Figura 4.29, o RL foi recalculado com as espessuras das amostras mais próximas, ou seja, as amostras SiC50 de 1,97 mm e MnZn60 de 2,90 mm, Figura 4.30. Ajustando somente a espessura, os resultados ficam em -23,41 dB em 15,93 GHz. Este valor é bem próximo à estimativa feita previamente, pois as espessuras reais das amostras são bem próximas das que foram estimadas anteriormente. O resultado de refletividade com a correção de permissividade e permeabilidade é idêntico ao resultado com a correção de espessura, pois estas foram as propriedades eletromagnéticas utilizadas para fazer o gráfico 3D. A refletividade experimental deste resultado tem valor próximo à -15,01 dB em 15,29 GHz, uma diferença de 0,64 GHz para frequências mais baixas, que pode ser explicado por causa de uma possível lacuna de ar entre as amostras, tornando a estrutura um pouco mais espessa.

Figure 4.30 - Comparação dos valores de RL calculados com espessuras reais, características eletromagnéticas reais e medida experimental da estrutura de (SiC40+MnZn60).

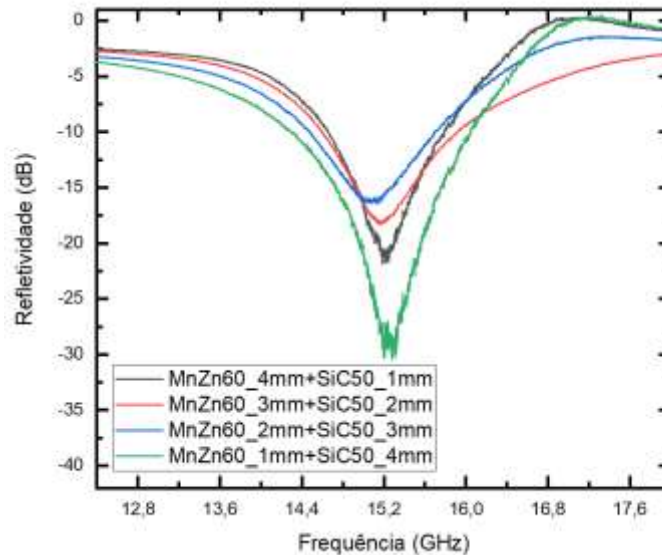


Fonte: Produção do autor.

A última estrutura explorada é a apresentada na Figura 4.31, onde foi investigado da combinação das amostras MnZn60 e SiC50 na primeira e na segunda camada, respectivamente. Neste caso, a espessura total da estrutura também é de 5,00 mm. O melhor resultado encontrado foi da estrutura

MnZn60_4,00mm+SiC50_1,00mm, com valor de RL de -30,45 dB em 15,28 GHz.

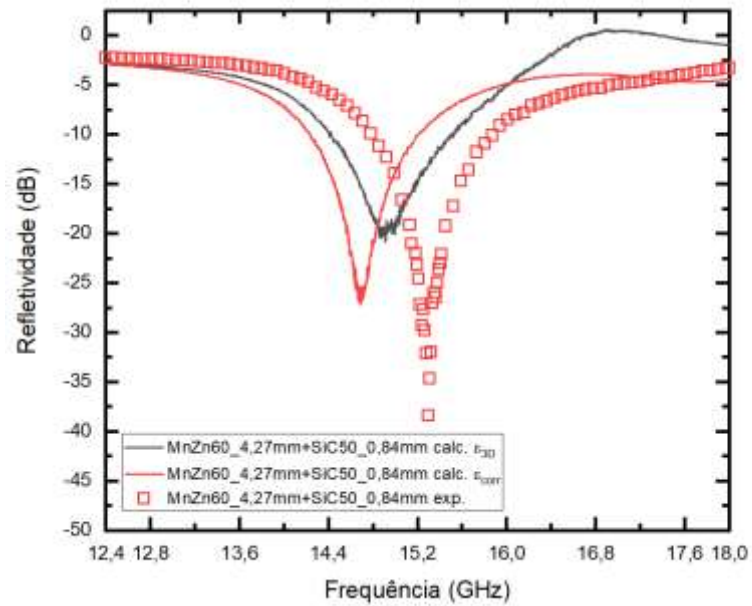
Figura 4.31 -Comparação entre as os valores de RL calculado com estrutura de (MnZn60+SiC50).



Fonte: Produção do autor.

Ajustando os valores de cada espessura de acordo com as espessuras disponíveis nos lotes de amostras, a estrutura investigada é MnZn60_4,27mm+SiC50_0,84mm, apresentada na Figura 4.32. A estrutura com as espessuras corrigidas apresenta uma refletividade de -20,86 dB em 14,91 GHz. Após a correção de ϵ e μ das amostras, o cálculo resulta em -27,27 dB em 14,69 GHz, resultando em um deslocamento de 0,22 GHz. Esse deslocamento ocorre devido aos valores de ϵ e μ serem diferentes dos valores usados para o cálculo dos gráficos 3D. O resultado experimental apresenta uma refletividade de -38,40 dB em 15,29 GHz, com o pico deslocando 0,60 GHz para frequências mais altas. A provável causa da diferença entre as refletividades calculada e medida é a superfície da amostra.

Figura 4.32 - Comparação dos valores de RL calculados com espessuras reais, características eletromagnéticas reais e medida experimental da estrutura de (MnZn60+SiC50).



Fonte: Produção do autor.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho avaliou estruturas multicamadas utilizando compósitos feitos à base de negro de fumo, carbetto de silício e ferrita de manganês zinco na faixa de frequência da banda K_u . Foram avaliadas 6 amostras: NF1; NF2; MnZn60; MnZn70; SiC40 e; SiC50.

Foi utilizado uma estratégia simples para identificar as melhores medidas de refletividade, tanto para amostras de camada única quanto para estruturas multicamadas. Por conta dessa estratégia, alguns resultados apresentaram diferenças significativas entre valores de RL calculado e medidos. Essas diferenças foram justificadas durante a discussão dos resultados, tais como disposição não perfeita da amostra no *offset*, imperfeições na superfície da amostra ou até mesmo pequena distância entre as camadas, formando uma lacuna de ar. A imprecisão na medida de espessura da amostra também pode contribuir como uma fonte de erro, já que a medida com o paquímetro deve ser feita com extremo cuidado para não pressionar a amostra. Outra fonte de erro apontada durante a discussão são os valores de permissividade e permeabilidade utilizados, já que a estratégia para encontrar a melhor refletividade foi baseada em apenas seis propriedades eletromagnéticas, uma de cada material.

Foram explorados dois efeitos que atenuam o sinal em uma estrutura multicamada. O primeiro consiste em utilizar, na primeira camada, um material com uma impedância característica mais próxima à do ar, evitando que a onda incidente seja completamente refletida e permitindo que a segunda camada atenuem mais o sinal. O segundo efeito consiste em deixar o material mais absorvedor na primeira camada, criando um espaço para ressonância do sinal entre este material e a placa metálica. Ambos apresentaram grande potencial de absorção, onde foi possível observar que os materiais e as espessuras utilizadas fazem com que os picos de absorção se desloquem na faixa de frequência da banda K_u . O melhor resultado experimental obtido foi com a estrutura MnZn60_4.27mm+SiC50_0,84mm, com uma atenuação de -38,40 dB em 15,29 GHz, equivalente a mais de 99,9% de atenuação do sinal.

Comparando com o resultado calculado, a diferença em frequência foi de 0,60 GHz que, apesar de ser uma diferença significativa, pode ser melhorada evitando as fontes de erro apontadas anteriormente. O resultado com menor diferença entre refletividade calculada e medida foi a estrutura SIC40_4,00mm+MnZn60_2,00mm, com uma diferença de 0,04 GHz.

Desta forma, pode-se dizer que a validação experimental da refletividade utilizando guia de ondas retangular é possível, mas requer uma metodologia eficaz para identificar os melhores resultados e prevenir todas as fontes de erros existentes.

Ainda, mostrou-se que as estruturas multicamadas podem ser projetadas para atenuar um sinal em frequência específica, possibilitando a sintonização da estrutura através da quantidade de aditivo utilizado ou das espessuras da estrutura e/ou camadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMARAL JUNIOR, M. A. **Obtenção e caracterização de compósitos carbono ativada aplicados a materiais eletromagnética na faixa de frequência de 8,2 à 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.
- AHMAD, H. et al. Stealth technology: methods and composite materials: a review. **Polymer Composites**, v. 40, n. 12, p. 4457-4472, 2019.
- 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.
- BARBA, A. A. et al. Carbon black/silicone rubber blends as absorbing materials to reduce Electro Magnetic Interferences (EMI). **Polymer Bulletin**, v. 57, n. 4, p. 587-593, 2006.
- BAKER-JARVIS, J. **Transmission/reflection and short-circuit line permittivity measurements**. [S.l.]: National Institute of Standards and Technology Colorado, 1990.
- CALLISTER JUNIOR, W. D. RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.
- CAO, X. G.; REN, H.; ZHANG, H. Y. Preparation and microwave shielding property of silver-coated carbonyl iron powder. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 631, p. 133–137, may 2015.
- CENTRO TÉCNICO AEROESPACIAL (CTA). E. L. Nohara, I. M. Martin, M. C. Rezende. **Processamento de ferritas à base de Bário (Ba), Chumbo (Pb), Cobalto (Co), Cromo (Cr), Escândio (Sc), Manganês (Mn), Níquel (Ni), Titânio e Zinco (Zn) pelo processo de metalurgia do pó, visando aplicações de blindagem eletromagnética na faixa de 2-40 GHz nas áreas aeroespacial e afins**. INPI 9907616. Depósito: 20/13/1999a.
- CHEN, L.-F. et al. **Microwave electronics: measurement and materials characterization**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2004.
- CHUNG, D. D. L. Electrical applications of carbon materials. **Journal of Materials Science**, v. 39, n. 8, p. 2645–2661, apr 2004. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1023/B:JMSC.0000021439.18202.ea>>.

- DIAS, J. C. Refletividade de fótons microondas por tintas poliuretânicas aditadas com ferrita de nzn e mnzn. **Revista de Física Aplicada e Instrumentação**, v. 18, n. 1, p. 24–32, 2005. 1
- FANTE, R. L.; MCCORMACK, M. T. Reflection properties of the salisbury screen. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, v. 36, p.1443-1454, 1988.
- FOLGUERAS, L. C.; ALVES, M. A.; REZENDE, M. C. Dielectric properties of microwave absorbing sheets produced with silicone and polyaniline. **Materials Research**, v. 13, p. 197–201, mar 2010.
- 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.
- GONÇALVES, F. **Medição das propriedades constitutivas eletromagnéticas de materiais na faixa de 1 a 6 GHz pelo método do espaço livre**. 160 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.
- GONG, Y.-X.; ZHOU, Z.-X.; JIANG, J.-T.; ZHAO, H.-J. Design of ultra-wideband microwave absorber effectual for objects of arbitrary shape. **Chinese Physics B**, v. 24, n. 12, p. 124101, dec 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088/1674-1056/24/12/124101>>.
- HONGFEI, L.; JIANJIANG, W.; BAOCAL, X.; GUOSHUN, W.; YONGSHEN, H.; HAITAO, G.; WEIMIN, Y. Effects of mg doping on the intrinsic characteristics and absorption properties of micro-nano bafe 12 o 19 hollow multiphase ceramic microspheres. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 374, p. 530–538, 2015. 15
- HONG, W.; XIAO, P.; LUO, H.; LI, Z. Microwave axial dielectric properties of carbon fiber. **Scientific Reports**, v. 5, p. 14927, oct 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1038/srep14927>>.
- JANI, R. K. et al. Tuning of microwave absorption properties and Electromagnetic Interference (EMI) shielding effectiveness of nanosize conducting black-silicone rubber composites over 8-18 GHz. **Progress in Electromagnetics Research M**, v. 58, 2017
- KNOTT, E. F. **Radar cross section**. 2.ed. Norwood: Artech House, 1993.

- 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.
- LEDERER, P. G. **An introduction to Radar Absorbent Materials (RAM), royal signals and radar establishment**. Malvern, Worcestershire: [s.n.], 1986.
- LEE, S. M. **International encyclopedia of composites**. New York: VHC Publishers, 1991. v.6.
- LIU, Y.; ZHANG, Z.; XIAO, S.; QIANG, C.; TIAN, L.; XU, J. Preparation and properties of cobalt oxides coated carbon fibers as microwave-absorbing materials. **Applied Surface Science**, v. 257, n. 17, p. 7678–7683, jun 2011.
- LIU, Y.; LIU, X.; WANG, X. Double-layer microwave absorber based on CoFe₂O₄ ferrite and carbonyl iron composites. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 584, p. 249-253, 2014.
- MARINHO, C. S. **Caracterização de Materiais Absorvedores de Ondas Eletromagnéticas (MARE)** - I. 2010. Disponível em: <https://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialcaracmat/default.asp>. Acesso em: 26 set. 2019.
- MORGAN, P. **Carbon fibers and their composites**. [S.l.]: CRC Press, 2005.
- MUNK, B. A. **Frequency selective surfaces: theory and design**. [S.l.]: Wiley-Interscience, 2000. 13
- NOHARA, L. E. **Materiais absorvedores de radiação magnética (8-12GHz) obtidos pela combinação de compósitos avançados dielétricos e revestimentos magnéticos**. 220 p. Tese (Doutorado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica) — Instituto Tecnológico Aeroespacial (ITA), São José dos Campos, 2003.
- PEIXOTO NETO, J. J. G. **Projeto de absorvedores de micro-ondas usando superfícies seletivas em frequência**. 2016. 48p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.
- REJAS, P. E. B. **Filmes finos metálicos absorvedores de radiação eletromagnética aplicados a tecnologia furtiva**. 2014. 53 f. Monografia (Graduação em Engenharia Aeroespacial) –Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.
- SADIKU, Matthew N. O. **Elementos de eletromagnetismo**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2012. 704 p

SAVILLE, P. **Review of radar absorbing materials**. Tese (Doutorado) — Defense Research and Development Canada, Canada, 2005.

SFALSIN, A. F. **Materiais absorvedores de radiação eletromagnética baseados em negro de fumo e papel celulósico na banda X (8,2 - 12,4 GHz)**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade de Taubaté, Taubaté, 2008.

SILVA, F. S. **Obtenção de estruturas híbridas absorvedoras de radiação eletromagnética na faixa de microondas aplicadas no setor aeronáutico**. 2000. Tese (Doutorado em Física) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2000.

SILVA, V. A. et al. Comportamento eletromagnético de materiais absorvedores de micro-ondas baseados em hexaferrita de Ca modificada com íons CoTi e dopada com La. **Journal of Aerospace Technology and Management**, v. 1, n. 2, p. 255-263, 2009.

SISTEMAS DE ARMAS (Org.). **Materiais absorvedores de radiação eletromagnética**. 2003. Disponível em:<<http://sistemasdearmas.com.br/ge/furt03ram.html>>. Acesso em: 20 nov. 2019.

TOIT, L. J. ; CLOETE, J. H. A design process for Jaumann absorbers. In: ANTENNAS AND PROPAGATION SOCIETY INTERNATIONAL SYMPOSIUM, 1989. **Proceedings...** 1989.

VERGARA, D. E. F.; LOPES, B. H. K.; QUIRINO, S. F.; BOSS, A. F. N.; AMARAL-LABAT, G. A.; BALDAN, M. R. Frequency selective surface properties of microwave new absorbing porous carbon materials embedded in epoxy resin. **Materials Research**, v. 22, 2019.

WANG et. al. The electromagnetic property of chemically reduced graphene oxide and its application as microwave absorbing material. **Applied Physics Letters**, v. 98, 2011.

ZHANG, B. et al. Microwave properties of de-aggregated flake-shaped carbonyl-iron particle composites at 2-18GHz. **IEEE Transactions on Magnetism**, v. 42. n.7, p.1778-1781, 2006.

APÊNDICE A - FICHAS CRISTALOGRÁFICAS

Name and formula

Reference code: 01-089-7555

Mineral name: Franklinite
Compound name: Zinc Manganese Iron Oxide
ICSD name: Zinc Manganese Iron Oxide

Empirical formula: $\text{Fe}_2\text{O}_4\text{Zn}$
Chemical formula: $(\text{Zn}, \text{Mn}, \text{Fe})(\text{Fe}, \text{Mn})_2\text{O}_4$

Crystallographic parameters

Crystal system: Cubic
Space group: Fd-3m
Space group number: 227

a (Å): 8,4688
b (Å): 8,4688
c (Å): 8,4688
Alpha (°): 90,0000
Beta (°): 90,0000
Gamma (°): 90,0000

Calculated density (g/cm³): 5,14
Volume of cell (10⁶ pm³): 607,39
Z: 8,00

RIR: 5,06

Subfiles and quality

Subfiles: Corrosion
ICSD Pattern
Inorganic
Mineral

Quality: Calculated (C)

Comments

ICSD collection code: 087863
Creation Date: 01/01/1970
Modification Date: 01/01/1970
ICSD Collection Code: 087863
Temperature Factor: ATF
Calculated Pattern Original Remarks: REM TEM 296
Sample Source or Locality: Specimen from Franklin, New Jersey, USA

Analysis: $(\text{Zn}_{0.591}\text{Mn}_{0.300}\text{Mg}_{0.035}\text{Al}_{0.028}\text{Fe}_{0.047})(\text{Zn}_{0.011}\text{Mn}_{0.126}\text{Fe}_{1.863})\text{O}_4$
 Cation distribution in natural Zn-spinels: franklinite
 Additional Patterns: See PDF 89-7550.

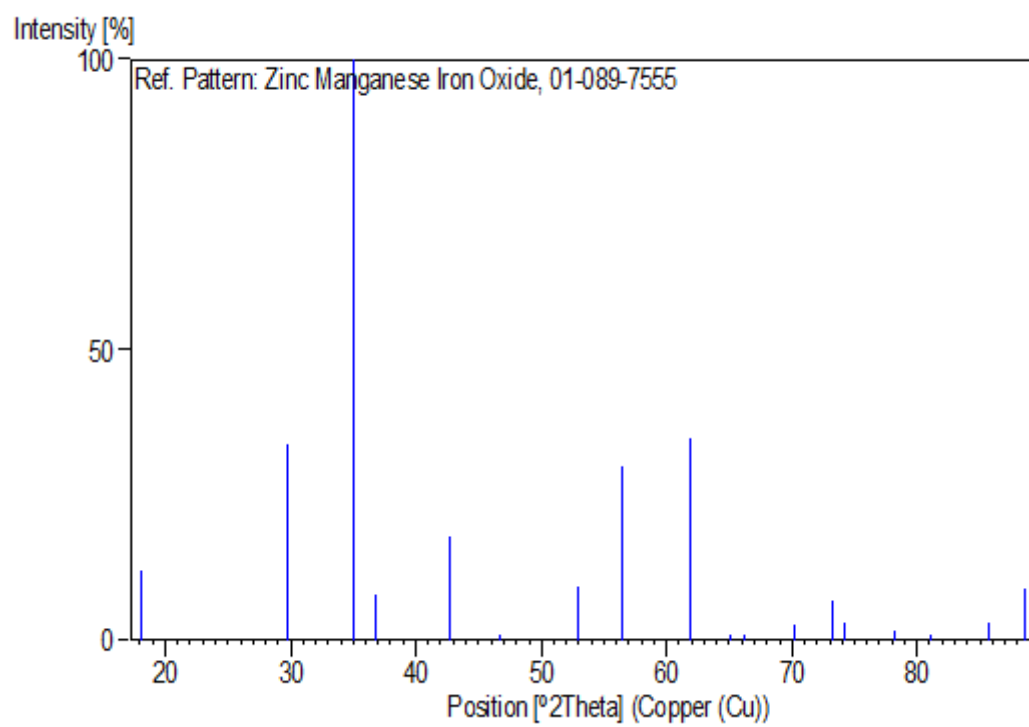
References

Primary reference: *Calculated from ICSD using POWD-12++*
 Structure: Lucchesi, S., Russo, U., della-Giusta, A., *Eur. J. Mineral.*, **11**, 501, (1999)

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	1	1	1	4,88946	18,129	11,9
2	2	2	0	2,99417	29,816	33,6
3	3	1	1	2,55344	35,116	100,0
4	2	2	2	2,44473	36,732	7,9
5	4	0	0	2,11720	42,671	18,0
6	3	3	1	1,94288	46,716	0,2
7	4	2	2	1,72869	52,923	9,1
8	3	3	3	1,62982	56,410	30,1
9	4	4	0	1,49709	61,932	34,9
10	5	3	1	1,43149	65,110	0,8
11	4	4	2	1,41147	66,151	0,1
12	6	2	0	1,33903	70,237	2,8
13	5	3	3	1,29148	73,232	6,7
14	6	2	2	1,27672	74,219	3,0
15	4	4	4	1,22237	78,125	1,7
16	5	5	1	1,18587	81,018	0,5
17	6	4	2	1,13169	85,791	3,1
18	7	3	1	1,10254	88,639	8,8

Stick Pattern



Name and formula

Reference code: 00-041-1487
Mineral name: Graphite-2H
Compound name: Carbon
Common name: C.I. Pigment Black 10
PDF index name: Carbon
Empirical formula: C
Chemical formula: C

Crystallographic parameters

Crystal system: Hexagonal
Space group: P63/mmc
Space group number: 194

a (Å): 2,4704
b (Å): 2,4704
c (Å): 6,7244
Alpha (°): 90,0000
Beta (°): 90,0000
Gamma (°): 120,0000
Calculated density (g/cm³): 2,24
Measured density (g/cm³): 2,16
Volume of cell (10⁶ pm³): 35,54

RIR: -4,00

Subfiles and quality

Subfiles: Alloy, metal or intermetallic Common Phase Educational
pattern Forensic
Inorganic
Mineral
Pigment/Dye
e
Quality: Indexed (I)

Comments

Color: Black
Creation Date: 01/01/1970
Modification Date: 01/01/1970
Sample Source or Locality: Specimen from Netolice,
Czechoslovakia Color: Black
Additional Patterns: To replace 1-640, 1-646, 2-456, 3-401, 23-64, 25-284 and 34-567 and
validated by calculated pattern 25-284

Temperature of Data Collection: Pattern taken at 25(1) C.

REFERENCES

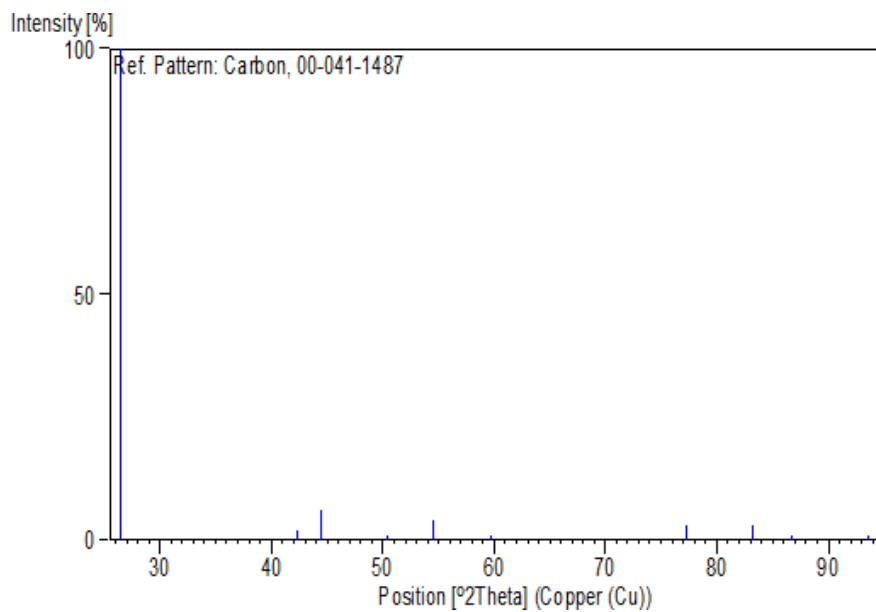
Primary reference: Sanc, I., Polytechna, Foreign Trade Corporation, Panska, Czechoslovakia., *ICDD Grant-in-Aid*, (1990)

Structure: *Aust. J. Chem.*, **42**, 479, (1989)

PEAK LIST

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	0	0	2	3,37563	26,382	100,0
2	1	0	0	2,13865	42,223	2,0
3	1	0	1	2,03901	44,393	6,0
4	1	0	2	1,80737	50,453	1,0
5	0	0	4	1,68110	54,544	4,0
6	1	0	3	1,54777	59,694	1,0
7	1	1	0	1,23408	77,245	3,0
8	1	1	2	1,16038	83,186	3,0
9	0	0	6	1,12084	86,826	1,0
10	2	0	1	1,05672	93,598	1,0

Stick Pattern



Name and formula

Reference code: 01-075-1541
Mineral name: Moissanite 6H
Compound name: Silicon Carbide
ICSD name: Silicon Carbide
Empirical formula: SiC
Chemical formula: SiC

Crystallographic parameters

Crystal system: Hexagonal
Space group: P63
Space group number: 173
a (Å): 3,0950
b (Å): 3,0950
c (Å): 15,1700
Alpha (°): 90,0000
Beta (°): 90,0000
Gamma (°): 120,0000
Calculated density (g/cm³): 3,17
Measured density (g/cm³): 3,12
Volume of cell (10⁶ pm³): 125,85
Z: 6,00
RIR: 1,33

Subfiles and quality

Subfiles: Alloy, metal or intermetallic
ICSD Pattern
Inorganic
Mineral
Quality: Calculated (C)

Comments

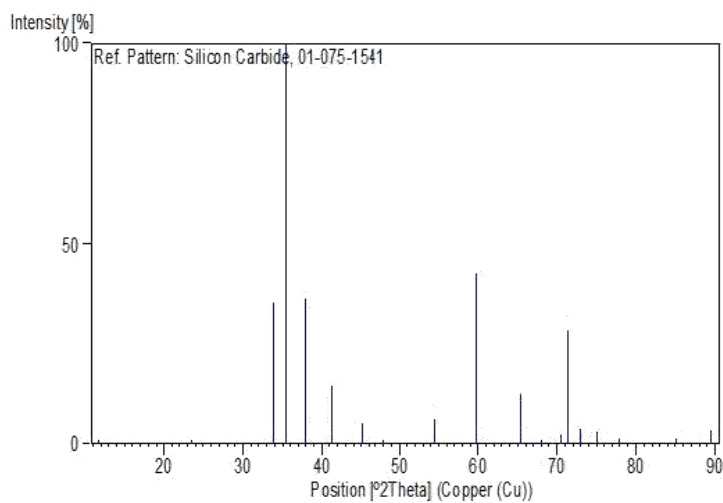
ICSD collection code: 031069
Creation Date: 01/01/1970
Modification Date: 01/01/1970
ICSD Collection Code: 031069
Test from ICSD: No R value given
Test from ICSD: At least one TF missing
Test from ICSD: Calc. density unusual but tolerable
Additional Patterns: See PDF 29-1131. Die Gitterstruktur des Karborunds (Si C) I.

References

Primary reference: *Calculated from ICSD using POWD-12++, (1997)*
Structure: Ott, H., *Z. Kristallogr., Kristallgeom., Kristallphys., Kristallchem.*, **61**, 515, (1925)

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta [deg]	I [%]
1	0	0	2	7,58500	11,658	0,1
2	0	0	4	3,79250	23,438	0,1
3	1	0	1	2,63947	33,936	35,0
4	0	0	6	2,52720	35,493	100,0
5	1	0	3	2,36822	37,963	36,2
6	1	0	4	2,18886	41,209	14,4
7	1	0	5	2,00875	45,098	5,2
8	0	0	8	1,89625	47,936	0,1
9	1	0	7	1,68522	54,399	6,3
10	1	0	8	1,54750	59,705	42,3
11	1	0	9	1,42687	65,347	12,4
12	1	1	5	1,37854	67,943	0,1
13	2	0	1	1,33497	70,482	2,4
14	1	1	6	1,31989	71,410	28,4
15	2	0	3	1,29545	72,971	3,9
16	0	0	12	1,26360	75,122	3,0
17	1	0	11	1,22629	77,828	1,4
18	1	1	9	1,13983	85,033	1,2
19	2	0	8	1,09443	89,471	3,3

Stick Pattern

PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS EDITADAS PELO INPE

Teses e Dissertações (TDI)

Teses e Dissertações apresentadas nos Cursos de Pós-Graduação do INPE.

Manuais Técnicos (MAN)

São publicações de caráter técnico que incluem normas, procedimentos, instruções e orientações.

Notas Técnico-Científicas (NTC)

Incluem resultados preliminares de pesquisa, descrição de equipamentos, descrição e ou documentação de programa de computador, descrição de sistemas e experimentos, apresentação de testes, dados, atlas, e documentação de projetos de engenharia.

Relatórios de Pesquisa (RPQ)

Reportam resultados ou progressos de pesquisas tanto de natureza técnica quanto científica, cujo nível seja compatível com o de uma publicação em periódico nacional ou internacional.

Propostas e Relatórios de Projetos (PRP)

São propostas de projetos técnico-científicos e relatórios de acompanhamento de projetos, atividades e convênios.

Publicações Didáticas (PUD)

Incluem apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

Publicações Seriadas

São os seriados técnico-científicos: boletins, periódicos, anuários e anais de eventos (simpósios e congressos). Constam destas publicações o International Standard Serial Number (ISSN), que é um código único e definitivo para identificação de títulos de seriados.

Programas de Computador (PDC)

São as sequências de instruções ou códigos, expressos em uma linguagem de programação compilada ou interpretada, a ser executada por um computador para alcançar um determinado objetivo. São aceitos tanto programas fonte quanto executáveis.

Pré-publicações (PRE)

Todos os artigos publicados em periódicos, anais e como capítulos de livros.