



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÕES



sid.inpe.br/mtc-m21d/2021/07.05.15.12-TDI

COMPÓSITOS DE FERROCARBONILA EM RESINA EPÓXI COMO MATERIAL ABSORVEDOR DE RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA NA BANDA-KU

Ana Paula Silva de Oliveira

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores, orientada pelos Drs. Sergio Luiz Mineiro, e Maurício Ribeiro Baldan, aprovada em 21 de maio de 2021.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34T/452M3DL>>

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-m21d/2021/07.05.15.12-TDI

COMPÓSITOS DE FERROCARBONILA EM RESINA EPÓXI COMO MATERIAL ABSORVEDOR DE RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA NA BANDA-KU

Ana Paula Silva de Oliveira

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores, orientada pelos Drs. Sergio Luiz Mineiro, e Maurício Ribeiro Baldan, aprovada em 21 de maio de 2021.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34T/452M3DL>>

INPE
São José dos Campos
2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Oliveira, Ana Paula Silva de.

Ol4c Compósitos de ferrocarbonila em resina epóxi como material absorvedor de radiação eletromagnética na banda-KU / Ana Paula Silva de Oliveira. – São José dos Campos : INPE, 2021.
xxviii + 107 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21d/2021/07.05.15.12-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.

Orientador : Drs. Sergio Luiz Mineiro e Maurício Ribeiro Baldan.

1. Ferrocarbonila. 2. Materiais Absorvedores. 3. Método de Transmissão e Reflexão (NRW). 4. Parametro-S. 5. Simulação. I.Título.

CDU 661.872:661.668



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/).



INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

Serviço de Pós-Graduação - SEPGR

DEFESA FINAL DE DISSERTAÇÃO DA ANA PAULA SILVA DE OLIVEIRA BANCA Nº 184/2021

No dia 21 de maio de 2021, às 14h00min, por teleconferência, a aluna mencionada acima defendeu seu trabalho final (apresentação oral seguida de arguição) perante uma Banca Examinadora, cujos membros estão listados abaixo. A aluna foi APROVADA pela Banca Examinadora, por unanimidade, em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de Mestre em ETE/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: "COMPÓSITOS DE FERROCARBONILA EM RESINA EPÓXI COMO MATERIAL ABSORVEDOR DE RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA NA BANDA K_u "

Membros da banca:

Dr. Maurício Ribeiro Baldan – Presidente - INPE/COPDT
Dr. Sergio Luiz Mineiro- Orientador - INPE/COPDT
Dr. Sayuri Okamoto - Membro da banca - INPE/COPDT
Dr. Jorge Tadao Matsushima - Membro Externo - FATEC



Documento assinado eletronicamente por **Sergio Luiz Mineiro, Pesquisador Titular**, em 05/07/2021, às 15:08 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Sayuri Okamoto, Tecnologista**, em 05/07/2021, às 15:41 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Mauricio Ribeiro Baldan, Pesquisador**, em 05/07/2021, às 23:51 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Jorge Tadao Matsushima (E), Usuário Externo**, em 12/07/2021, às 13:19 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <http://sei.mctic.gov.br/verifica.html>, informando o código verificador **7828481** e o código CRC **DD87CCAA**.

Referência: Processo nº 01340.004361/2021-70

SEI nº 7828481

“Viver é como andar de bicicleta: É preciso estar em constante movimento para manter o equilíbrio”.

ALBERT EINSTEIN

A Deus, meus pais Sylvio e Terezinha in memoriam

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me permitir completar mais uma etapa da minha vida.

A minha família que sempre me incentivou e apoiou, possibilitando a oportunidade de ampliar meus horizontes.

Ao meu orientador Dr. Maurício Ribeiro Baldan, por ter acreditado em mim e no meu trabalho, pela dedicação e ensinamentos, paciência e compreensão durante esta jornada.

Ao meu orientador Dr. Sergio Luiz Mineiro, pela disponibilidade, atenção e oportunidade para que fosse possível a construção desta trajetória acadêmica.

Ao Dr. Miguel Angelo do Amaral Junior, pela amizade, pelo incentivo, pela disposição em sanar minhas dúvidas, pelo conhecimento e pelas experiências compartilhadas.

Agradeço em particular as minhas grandes amigas Aline Castilho Rodrigues e Aline Fontana Batista, nosso trio 3A, pelo incentivo, por estarem ao meu lado em momentos difíceis, sempre com a certeza que tudo daria certo no final e por nunca me deixar desistir.

Ao Dr. Jorge Tadao Matsushima, pela amizade, pelo conhecimento repassado, pelo companheirismo e apoio nos momentos de incerteza.

À Ariane Ap. Teixeira, pela amizade, pela troca de experiências e parceria.

Ao Plínio Tenório por sempre me incentivar a dar continuidade na vida acadêmica e profissional.

Ao Dra. Gisele Amaral Labat, pela cumplicidade, pelos conselhos, pelo apoio, incentivo e colaboração.

Gostaria também de agradecer aos professores, todos aqueles que tive a honra de poder compartilhar seus conhecimentos, seja durante as disciplinas, seminários, palestras, ou mesmo nas conversas pelos corredores do Instituto.

Ao Grupo de Pesquisa e Desenvolvimento de Materiais Aplicados a Aeronautica e Aeroespacial, todos foram muito importantes na execução deste trabalho.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, pela oportunidade de realização do curso e por disponibilizar sua infra-estrutura para realização deste trabalho.

À CAPES pelo auxílio financeiro da bolsa, durante a realização deste trabalho.

Agradeço a todos aqueles que, de maneira direta ou indireta, contribuíram para realização deste trabalho.

RESUMO

A popularidade de dispositivos eletrônicos móveis tais como tablets, computadores, smartphones, entre outros, somados aos dispositivos fixos como torres de alta tensão e redes de transmissão de energia, antenas de radiodifusão e de telecomunicação, tem causado um aumento na emissão e propagação de radiação eletromagnética e assim tem se tornado uma fonte de poluição eletromagnética (PEM). A PEM é indesejável, incontrollável e tem se tornado um problema cada vez mais sério nos dias atuais, pois, além da exposição invisível aos humanos, e estar sempre presente, pode causar danos biológicos. Além disto, a PEM pode interferir no correto funcionamento de dispositivos eletrônicos. Neste sentido, materiais absorvedores de radiação eletromagnética (MARE) apresentam características únicas no sentido de promover a troca de energia da radiação eletromagnética pela energia térmica. O uso destes materiais se faz necessário em diversos dispositivos como, de telecomunicações, processamento digital de informações, redes de distribuição e energia, telefonia celular, equipamentos hospitalares entre outros. No entanto, esses materiais apresentam como principais desvantagens, o peso e o volume ocupado pelo material final. Devido ao grande potencial de aplicação, este trabalho propõe a preparação de amostras MARE em uma matriz de epóxi, usando como aditivo a ferrocenona (FC). Foram produzidas amostras nas concentrações de 60%, 70% e 80% de FC nas espessuras de 1 mm, 2 mm e 3 mm. A melhor atenuação ocorreu para a amostra de 2 mm com 70% de FC, e apresentou uma atenuação de -22,0 dB em 12,4 GHz. As amostras com 60% e 70% também apresentaram atenuação abaixo de -10 dB, o que equivale a 90% atenuação. Os resultados experimentais foram corroborados por um modelo teórico. Um estudo teórico, em diferentes espessuras, evidenciou que para a concentração de 70% a espessura de 1,5 mm apresentaria uma atenuação de aproximadamente 36 dB. Esta amostra foi produzida e os resultados experimentais revelaram uma atenuação em 16,7 GHz com -36,7 dB. Estes resultados mostram que para a FC, há uma concordância entre os resultados experimentais e teóricos. Entre os mecanismos de atenuação estudados verificou-se que tanto a corrente parasita (Eddy Current) quanto o cancelamento de $\frac{1}{4}$ de onda podem ser os mecanismos com maior influência no processo de atenuação.

Palavras-chave: Ferrocenona. Materiais Absorvedores. Método de Transmissão e Reflexão (NRW). Parametro-S. Simulação.

CARBONYL IRON COMPOSITES IN EPOXY RESIN AS AN ABSORBER MATERIAL FOR ELECTROMAGNETIC RADIATION IN THE KU BAND

ABSTRACT

The popularity of mobile electronic devices such as tablets, computers, smartphones, among others, added to fixed devices such as high voltage towers and power transmission networks, broadcasting and telecommunication antennas, has caused an increase in the emission and propagation of radiation electromagnetic pollution and thus has become a source of electromagnetic pollution (PEM). PEM is undesirable, uncontrollable, and it becomes a serious problem these days. Besides, PEM is invisible, it is always present and can cause biological damage to human beings. Furthermore, PEM can interfere with the correct functioning of electronic devices. In this sense, electromagnetic radiation absorbing materials (MARE) have unique characteristics in the sense of promoting the exchange of energy from electromagnetic radiation to thermal energy. The use of these materials is necessary for various devices such as telecommunications, digital information processing, distribution and energy networks, cell telephony, hospital equipment, among others. However, these materials have, as main disadvantages, the weight, and volume occupied by the final material. Due to the great application potential, this work proposes the preparation of MARE samples in an epoxy matrix, using ferrocobonyl (FC) as an additive. Samples were produced at concentrations of 60%, 70%, and 80% FC in thicknesses of 1 mm, 2 mm, and 3 mm. The best attenuation occurred for the 2 mm sample with 70% FC, and had an attenuation of -22.0 dB at 12.4 GHz. The samples with 60 and 70% also had attenuation below -10 dB, equivalent to 90% attenuation. The experimental results were supported by a theoretical model. A theoretical study, in different thicknesses, showed that for a concentration of 70% the thickness of 1.5 mm would present an attenuation of approximately 36 dB. This sample was produced and experimental results revealed an attenuation at 16.7 GHz with -36.7 dB. These results show that for FC, there is an agreement between experimental and theoretical results. Among the studied attenuation mechanisms, it was found that both the Eddy Current and the $\frac{1}{4}$ wave cancellation maybe the mechanisms with the greatest influence on the attenuation process.

Keywords: Carbonyl iron. Eletromagnetic Radiation Absorbing Materials. Transmission and reflection method (NRW). Parameter-S. Simulation.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
1.1 Classificação de bandas na faixa de frequência de micro-ondas.	5
2.1 Propagação da onda eletromagnética.	10
2.2 Espectro Eletromagnético.	11
2.3 Representação de domínios magnéticos e a parede dos domínios.	18
2.4 Arranjos de Momentos Magnéticos.	19
2.5 Imagem de guias de ondas retangular (a) e circular (b).	20
2.6 Linhas de Campo para o Modo TE.	27
2.7 Representação de um dispositivo com duas portas, em que: S_{11} , S_{12} , S_{21} e S_{22}	28
2.8 Fluxograma do Método NRW.	33
2.9 Transmissão de ondas eletromagnéticas em uma amostra e interação com um campo elétrico.	33
2.10 Esquema ilustrativo do efeito de interação da onda como o MARE.	37
2.11 Esquema da conservação de energia com placa metálica	38
2.12 Representação esquemática da medida de refletividade no guia de onda.	39
2.13 Tipos de Absorvedores, (a) plano, (b) $\lambda/4$, (c) multicamada, (d) Jaumann, (e) dente de serra, (f) piramidal e (g) tipo metamaterial.	40
2.14 Funcionamento das linguagens compiladas.	42
2.15 Prompt de comando do Python.	43
2.16 Tela inicial do programa no editor VSCode.	43
2.17 Fluxograma das etapas do programa.	44
3.1 Fluxograma da dissertação.	45
3.2 Estrutura da Ferropentacarbonila $Fe(Co)_5$	47
3.3 Processo de Purificação da Ferropentacarbonila.	47
3.4 Processo Final da Ferrocarbonila.	48
3.5 Estrutura CCC da Ferrocarbonila.	48
3.6 Pó de Ferrocarbonila.	49
3.7 Grupo Epóxi.	50
3.8 Matriz Polimérica Resina Epocast.	51
3.9 Esquema Ilustrativo da confecção dos compósitos.	52
3.10 Molde utilizado para a confecção dos corpos de prova para a caracteriza- ção eletromagnética.	53
3.11 Imagem das amostras produzidas com diferentes concentrações de FC.	53
3.12 Dimensão do offset do guia de ondas da Banda-Ku.	54

3.13	Ilustração de amostras com imperfeições dimensionais em relação ao <i>offset</i> .	55
5.1	Analisador de Rede Vetorial.	59
5.2	Diagrama esquemático de um dispositivo de duas portas representando os parâmetros de espalhamento.	60
5.3	Kit Agilent P11644A.	61
6.1	Difratometria de Raios-X da Ferrocarbonila.	63
6.2	Micrografias da Ferrocarbonila.	64
6.3	Permissividade dos Compósitos de 60%.	65
6.4	Permissividade dos Compósitos de 70%.	66
6.5	Permissividade dos Compósitos de 80%.	67
6.6	Permissividade real da amostra de 3 mm nas três concentrações estudadas.	68
6.7	Permeabilidade dos Compósitos de 60%.	69
6.8	Permeabilidade dos Compósitos de 70%.	69
6.9	Permeabilidade dos Compósitos de 80%.	70
6.10	Permeabilidade da amostra de 3 mm nas três concentrações.	71
6.11	Refletividade do compósito de 60% de FC.	72
6.12	Refletividade do compósito de 70% de FC.	73
6.13	Refletividade do compósito de 80% de FC.	74
6.14	Mapa de tendência da reflexão das amostras de 60% em função da frequência e espessura.	75
6.15	Mapa de tendência da reflexão das amostras de 70% em função da frequência e espessura.	76
6.16	Mapa de tendência da reflexão das amostras de 80% em função da frequência e espessura.	77
6.17	Refletividade do Compósito 70% com 1,5 mm de espessura.	78
6.18	Tangentes de Perda Elétrica e Magnética dos compósitos de 60%.	79
6.19	Tangentes de Perda Elétrica e Magnética dos compósitos de 70%.	80
6.20	Tangentes de Perda Elétrica e Magnética dos compósitos de 80%.	80
6.21	Contribuição de Corrente Parasita para os três compósitos.	81
6.22	Correntes parasitas geradas no núcleo de energia.	82
6.23	Cálculo do cancelamento de $\frac{1}{4}$ do comprimento de onda.	83
6.24	Gráfico ε'' e ε' .	84
6.25	Permissividade e Permeabilidade do compósito 70% com 1,5 mm de espessura.	85
A.1	Difração de Raios-x por um material cristalino.	97
A.2	Representação do MEV.	99
B.1	Programa Python.	101

B.2	Programa Python.	102
B.3	Programa Python.	103
B.4	Programa Python.	104
B.5	Programa Python.	105
C.1	Ficha Cristalográfica ICDD 006-0696 da Ferrocarbonila.	106
C.2	Ficha Cristalográfica ICDD 006-0696 da Ferrocarbonila.	107

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
2.1 Guias de onda retangulares.	21
2.2 Frequência de corte para guias de onda retangulares.	26
2.3 Descrição do sistema sob análise.	34
2.4 Relação da refletividade em dB com a porcentagem de energia absorvida.	38
6.1 Valores médios de ε' e ε'' para as três concentrações de FC	67
6.2 Valores médios de μ' e μ'' para as três concentrações de FC	68

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CBERS	–	China-Brazil Earth Resources Satellite
DRX	–	Difratometria de Raios-X
DUT	–	Dispositivo em Teste
EIA	–	Eletronics Industry Association
EMI	–	Electromagnetic Interference
FC	–	Ferrocarbonila
FEG	–	Field Emission Gun
HARP	–	Tinta Anti-Radiação
ICDD	–	International Centre for Diffraction Data
IEEE	–	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
IEC	–	International Electrotechnical Commission
INPE	–	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
MARE	–	Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética
MEV	–	Microscopia Eletrônica de Varredura
NRW	–	Nilcolson Ross Wier
PEM	–	Poluição Eletromagnética
RCS	–	Seção Reta Radar
RL	–	Reflection Loss
TE	–	Transversal Elétrico
TEM	–	Transversal Eletromagnético
TM	–	Transversal Magnético
UV	–	Ultra Violeta
VNA	–	Analisador de Rede Vetorial

LISTA DE SÍMBOLOS

ε	–	permissividade elétrica
ε_0	–	permissividade elétrica do espaço livre
ε_r	–	permissividade elétrica relativa
μ	–	permeabilidade magnética
μ_0	–	permeabilidade magnética do espaço livre
μ_r	–	permeabilidade magnética relativa
f	–	frequência
f_c	–	frequência de corte
ρ	–	resistividade elétrica
σ	–	condutividade elétrica
\vec{E}	–	campo elétrico
\vec{F}	–	força elétrica
q	–	carga elétrica
\vec{B}	–	densidade de fluxo magnético
\vec{D}	–	densidade de fluxo elétrico
\vec{J}	–	densidade de corrente elétrica
λ	–	comprimento de onda
λ_0	–	comprimento de onda do espaço livre
λ_c	–	comprimento de onda da frequência de corte
v	–	velocidade de propagação
γ	–	constante de propagação
η	–	impedância do meio
\vec{P}_e	–	polarização elétrica
\vec{P}_m	–	polarização magnética
X_e	–	suscetibilidade elétrica
X_m	–	suscetibilidade magnética
δ	–	tangente de perda
$\tan\delta_\varepsilon$	–	tangente de perda elétrica
$\tan\delta_\mu$	–	tangente de perda magnética
Γ	–	coeficiente de reflexão
T	–	coeficiente de transmissão
S_{ij}	–	parâmetro S

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivo do projeto	5
1.2 Organização da dissertação	6
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1 Breve história das microondas e ondas eletromagnéticas	7
2.2 Eletromagnetismo aplicado a MARE	8
2.3 Equações de Maxwell	8
2.4 Propagação da onda eletromagnética em materiais	10
2.5 Propriedades eletromagnéticas dos materiais	11
2.5.1 Propriedades elétricas	15
2.5.2 Condutividade	15
2.5.3 Tangente de perda	16
2.5.4 Propriedades magnéticas	16
2.6 Guia de onda	19
2.6.1 Tipos de guia de onda	20
2.6.2 Equação da Onda em Guias Retangulares	21
2.6.3 Modo TE em guia de onda retangular	23
2.6.4 Frequência de corte	25
2.7 Parametros-S	27
2.8 Permissividade e Permeabilidade	30
2.8.1 Permissividade complexa	30
2.8.2 Permeabilidade complexa	31
2.9 NRW - Método Nicolson Ross Weir	32
2.10 Reflexão e Transmissão	36
2.10.1 Refletividade	38
2.11 Fundamentos e características dos absorvedores	40
2.12 Simulação eletromagnética	41
3 MATERIAIS E MÉTODOS	45
3.1 Fluxograma da dissertação	45
3.2 Materiais	46
3.2.1 Ferrocarbonila	46

3.3	Matriz resina Epóxi	49
3.4	Desenvolvimento do absorvedor	51
3.5	Métodos	54
3.5.1	Caracterização eletromagnética	54
4	TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL E MOR- FOLÓGICA	57
4.1	Difratometria de raios-X	57
4.2	MEV/FEG	57
5	TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO ELETROMAGNÉTICA	59
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	63
6.1	Caracterização estrutural e morfológica	63
6.2	Difratometria de raios-X	63
6.3	Microspia eletrônica de varredura (MEV/FEG)	64
6.4	Caracterização eletromagnética	64
6.4.1	Permissividade e Permeabilidade	65
6.4.2	Permissividade	65
6.4.3	Permeabilidade	68
6.4.4	Refletividade com placa metálica	71
6.4.5	Modelagem computacional	75
6.4.6	Mecanismos de atenuação	79
7	CONCLUSÕES	87
8	TRABALHOS FUTUROS	89
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91
	APÊNDICE A - TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO	97
A.1	Análise estrutural	97
A.1.1	Difração de Raios-X	97
A.2	Análise morfológica	98
A.2.1	Microscopia Eletrônica de Varredura	98
	ANEXO A - PROGRAMA EM LINGUAGEM PYTHON	100
B.1	Script	101

ANEXO B - FICHA CRISTALOGRÁFICA DA FERROCARBONILA 106

1 INTRODUÇÃO

Com o avanço da tecnologia vários sistemas de transferência de dados tornaram-se comuns em aplicações da engenharia. Vários sistemas que utilizam ondas eletromagnéticas com diferentes frequências de serviço são amplamente utilizados em comunicação sem fio, transmissão por satélite, tratamento médico, aplicações militares, entre outras aplicações. Porém, a expansão do número destes dispositivos emissores de radiação eletromagnética, apesar de extremamente necessários à sociedade, tem aumentado a poluição eletromagnética, que traz preocupação devido aos efeitos biológicos sobre os seres vivos e à interferência eletromagnética em dispositivos eletrônicos.

A fim de atenuar a interferência eletromagnética e compatibilidade eletromagnética em dispositivos eletrônicos modernos e em sistemas de telecomunicações, os Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética (MARE) estão sendo desenvolvidos. Por suas características constituídas os MARE apresentam uma infinidade de aplicações, como utilização em revestimento de câmeras anecoicas e em aplicações militares (WANG et al., 2011).

Após o desenvolvimento da teoria eletromagnética no século XIX, pesquisas estão sendo realizadas sobre MARE com a intenção de minimizar problemas que a interferência eletromagnética pode causar em muitas áreas tecnológicas. Desta forma, materiais diretamente utilizados como Sistema de Blindagem Eletromagnética é uma realidade (GOGOI et al., 2011). No Brasil, esta tecnologia está em desenvolvimento e é uma das linhas de pesquisa do grupo MAPA (Materiais Avançados e Pesquisas Aeroespaciais) do INPE (SILVEIRA et al., 2017), entre outros grupos, assim como a Divisão de Materiais do Instituto de Aeronáutica e Espaço do DCTA. Estes materiais têm aplicações em várias áreas dentre elas a área espacial, foco deste trabalho. Com isso materiais magnéticos têm sido estudados e utilizados como material atenuador de radiação micro-ondas devido a sua eficiência na blindagem (DUAN et al., 2010).

Dependendo da aplicação final, MARE podem ser produzidos em diferentes formas, usualmente são obtidos pela dispersão de um ou mais tipos de centros absorvedores em matrizes poliméricas, como por exemplo, borracha de silicone ou resinas epóxi.

Compósitos absorvedores em ferrocarbonila (FC) apresentam algumas vantagens como atuação em banda larga de frequência, menor espessura, embora tenha a desvantagem de possuir alta massa específica (XU et al., 2012). Além disso, a FC possui

alta temperatura de Curie e elevada intensidade de magnetização de saturação específica, sendo amplamente utilizada como centro absorvedor de micro-ondas na faixa de frequências de 2 a 18 GHz, quando inserida em uma matriz polimérica (CHEN et al., 2017).

O crescimento da pesquisa de materiais absorvedores é centralizado em países como: Estados Unidos, Alemanha e Grã-Bretanha. A Alemanha foi responsável por reduzir a seção reta radar (RCS) de periscópios de submarinos. Nos Estados Unidos, em um projeto organizado por Otto Halpern, foi desenvolvida a tinta antirradiação (HARP), com o objetivo de obter um absorvedor tipo revestimento, com espessura de aproximadamente 0,06 mm, com alto desempenho e uma característica de ressonância na Banda-X (REZENDE et al., 2003). No mesmo laboratório onde foi desenvolvida a tinta antirradiação, foi projetado o "absorvedor de tela Salisbury", que era um absorvedor tipo ressonante, com estrutura composta de folhas resistivas, e com valor de resistência de 377 Ohms. O absorvedor Salisbury patenteado consistia de uma face dianteira de lona grafitada, onde um espaçador de madeira fornecia a distância de 1/4 de onda da base metálica. Atualmente, este absorvedor de microondas utiliza uma folha frontal de fibra de vidro impregnada com grafite, um leve espaçador de espuma e um revestimento condutor protetor (JORDAN, 2013).

Inicialmente os absorvedores de radiação eletromagnética foram desenvolvidos principalmente para aplicações em câmaras anecoicas, sendo basicamente de compostos de materiais a base de carbono. Durante a Segunda Guerra Mundial começou-se um profundo interesse em absorvedores para uso militar. No projeto alemão de nome "Schornsteinfeger", foram desenvolvidos dois tipos de absorvedores usados para camuflagem, sendo montado no periscópio e no *snorkel*¹ de um submarino. Um dos absorvedores era feito de um material chamado "Wesch", que consistia de ferrocarbonila dispersa em uma folha de borracha. O segundo absorvedor, projetado por J. Jaumann, era um material do tipo banda larga composto de folhas resistivas de borracha sobrepostas e espaçadores de plástico de baixo valor dielétrico (JORDAN, 2013).

A tecnologia "*Stealth*", mais conhecida como tecnologia furtiva (que reduz a possibilidade de detecção por radares), tem suas pesquisas iniciadas durante a Primeira Guerra Mundial. Soviéticos experimentaram um material aplicado sobre a fuselagem de um avião Yakovlev AER-4, e aplicaram uma tinta branca prateada na parte in-

¹Componente comum em um submarino com objetivo a entrada de ar sem que haja a necessidade do submarino vir à superfície para renová-lo.

terna da aeronave para dificultar a detecção. A Alemanha testou um projeto *stealth* durante a Segunda Guerra Mundial, na tentativa de desenvolver uma nova tecnologia furtiva para esconder uma nave militar de radares. Os alemães aplicaram várias camadas de materiais absorvedores nos *snorkels* de *U-boats* (submarino), com a finalidade dos aviões não detectarem os submarinos. Nos Estados Unidos, durante a Segunda Guerra Mundial, a aplicação da tecnologia foi iniciada principalmente para reduzir as chances dos aviões de serem detectados por radar. Um material de revestimento absorvedor foi desenvolvido pela Northrop por volta de 1945 e era conhecido como MX-410, pouco eficaz devido ao peso, que afetou o desempenho do avião (KAPUR, 2014). A aplicação militar brasileira da tecnologia furtiva tem ocorrido de forma secreta, por estar intimamente ligada a uma área estratégica, essa tecnologia é um dos métodos que visa obter baixa detecção radar de alvos como plataformas terrestres, marítimas e aéreas (NOHARA, 2003).

O desenvolvimento de pesquisas na área de MARE inclui ainda a tecnologia Radome, que são confinantes de antenas, coberturas de curvatura côncava e contínua usadas para abrigar as antenas de radar. O principal objetivo do radome deve ser totalmente transparente para a onda eletromagnética (transmitida/recebida), semelhante à uma janela de vidro. Os radomes são montados em aeronaves, navios, carros e em instalações fixas baseadas no solo. Um dos benefícios para usar um radome é que ele permite o uso de uma antena de baixa potência, sistemas rotativos e design mecânico de antena mais fraca, seguido por uma redução significativa de preço, uma vez que a antena não é exposta ao clima externo. No caso de plataformas móveis de alta velocidade como aeronaves, um ponto importante está relacionado à forma aerodinâmica do radome para reduzir sua força de arrasto (SHAVIT, 2018).

Materiais absorvedores são úteis, não apenas na indústria de defesa, mas também em aplicações civis e engenharia aeroespacial. Nos últimos anos, o desenvolvimento da indústria aeroespacial não está atrelado apenas ao estudo, mas também voltada para a comercialização, que implica em um conhecimento profundo do ambiente onde a maioria das atividades é realizada. Em particular, os requisitos da missão espacial afetam altamente o design da espaçonave e a seleção de materiais nela empregados, caso dos MARE, em virtude dos riscos a que são submetidos, como radiação ionizante e ultravioleta (UV), ultra-alto vácuo, plasma, oxigênio atômico, micrometeoroides e detritos, bem como ciclos severos de temperatura. Os compósitos há muito tempo atraem o interesse da pesquisa aplicada e da engenharia da ciência dos materiais, graças à capacidade de melhorar as propriedades termo-mecânicas das estruturas, com redução de massa e volume ao mesmo tempo (DELFINI et al., 2018).

Na década de 50, a tecnologia de satélites passou por um avanço com o primeiro satélite lançado pelos Estados Unidos (Explorer I). Através da crescente necessidade de observação da Terra, o uso de imageamento por satélite é uma das alternativas para atender as necessidades de problemas passíveis de serem observados e analisados por dados orbitais de sensores remotos. O primeiro satélite brasileiro o SCD-1 (Satélite de Coleta de Dados) tem a função de realizar a coleta de dados ambientais para serem depois captados por estações rastreadoras. Além dos aspectos voltados à aplicação de dados de sensoriamento remoto, esta tecnologia está muito relacionada aos desenvolvimentos tecnológicos e industriais. No Brasil, o desenvolvimento de satélites de imageamento teve início em 1988 através de uma parceria entre Brasil e China, estabelecendo a construção, lançamento e operação de satélites, os CBERS (China-Brazil Earth Resources Satellite). O primeiro CBERS foi lançado em 1999, atualmente o CBERS-04 é o sexto satélite desenvolvido por meio desta parceria (EPIPHANIO, 2014).

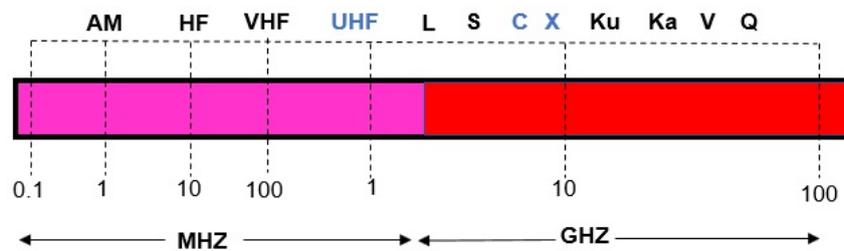
O programa CBERS, conta com seis satélites lançados com sucesso (1999, 2003, 2007, 2013, 2014 e 2019), isto mostra que o programa espacial brasileiro tem encontrado sua concretização nos satélites CBERS. No módulo de carga, o CBERS-4 possui quatro câmeras: a câmera Pancromática e Multiespectral (PANMUX), a Câmera Multiespectral (MUXCAM), o Scanner Infravermelho de Média Resolução (IRSCAM) e a Câmera *Wide Field Imaging* (WIFICAM). O PANMUX e o IRSCAM foram construídos pela China, enquanto o MUXCAM e o WIFICAM foram construídos pelo Brasil (BOGGIONE et al., 2014). Estas câmeras utilizam transmissores TWTA que operam na faixa de frequência da Banda-X (8,2 a 12,4 GHz) (EPIPHANIO, 2014).

O programa espacial brasileiro acaba de lançar o primeiro satélite de observação da Terra inteiramente desenvolvido no Brasil. O Amazonia 1 é um satélite de órbita Sol síncrona (polar) que irá gerar imagens do planeta a cada 5 dias. Para isso, possui um imageador óptico de visada larga (câmera com 3 bandas de frequências no espectro visível, e uma banda próxima do infravermelho) capaz de observar uma faixa de aproximadamente 850 km com 60 metros de resolução. O imageador do Amazônia-1 é um modelo da Câmera WFI utilizado no satélite CBERS (EPIPHANIO, 2014).

Um fator importante na comunicação de satélites é o uso de frequências de micro-ondas, na faixa de 1 a 60 GHz. As bandas mais exploradas para comunicação por satélite são as bandas C, X e Ku, onde oferecem mais largura de banda. A Banda-Ku tem se tornado interessante na comunicação de satélites, por ter uma característica que viabiliza a transmissão direta para pequenas antenas, o que favorece o nível de

potência do satélite ser o mais alto possível. A Figura 1.1 ilustra a classificação de bandas de frequência (MINOLI, 2015).

Figura 1.1 - Classificação de bandas na faixa de frequência de micro-ondas.



Fonte: Produção do autor.

Os materiais carbonosos, óxidos cerâmicos, ferromagnéticos e polímeros condutores são tradicionalmente MARE, usados como centros absorvedores de radiação indesejada. O uso destes materiais se faz necessário tanto em sistemas de telecomunicações, processamento digital de informações, redes de distribuição de energia, telefonia celular quanto em equipamentos hospitalares e representam a maior parte de aplicações destes materiais absorvedores, sendo de grande interesse científico e tecnológico. No entanto, as utilizações destes centros absorvedores apresentam como principais desvantagens o peso e volume ocupado pelo material absorvedor final.

1.1 Objetivo do projeto

Devido ao grande potencial da ferrocenona, este trabalho tem como objetivo produzir e estudar um compósito de baixo custo que seja capaz de atenuar ou refletir a radiação eletromagnética para obtenção de um absorvedor com máxima eficiência e com o mínimo de espessura em resina epóxi dentro da faixa de frequência de 12,4 -18 GHz. As resinas epóxi são geralmente utilizadas como revestimentos ou laminados. Sua aplicação se deve as suas propriedades, como a baixa viscosidade, e também uma ampla escolha de catalisadores, onde é possível realizar a cura em ambiente com temperaturas elevadas. As resinas epóxi também possuem baixo peso molecular, as propriedades mecânicas e elétricas são superiores a outras resinas e têm boa resistência térmica e química (ELLIS, 1993). Para estudar as diferenças morfo-

lógicas e estruturais foram utilizadas as técnicas: difratometria de raios X (DRX) e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Já para avaliar as propriedades eletromagnéticas das amostras foi utilizado um analisador de redes vetorial (VNA) acoplado a um guia de onda retangular na banda Ku, capaz de varrer a faixa de frequência de 12,4-18 GHz.

1.2 Organização da dissertação

Os capítulos restantes desta dissertação estão organizados da seguinte maneira:

- Capítulo 2: Revisão Bibliográfica feita na literatura sobre MARE, interação radiação matéria, mecanismos de absorção e reflexão da onda eletromagnética, estudo dos materiais dielétricos e magnéticos e métodos de caracterização para MARE.
- Capítulo 3: Explicação das técnicas empregadas nas amostras, como: caracterização morfológica, estrutural e eletromagnética.
- Capítulo 4: São apresentados as técnicas de caracterização estrutural e morfológica.
- Capítulo 5: São apresentados as caracterizações eletromagnéticas dos compósitos de ferrocarbonila em matriz epóxi.
- Capítulo 6: São apresentados os resultados e discussões das caracterizações estrutural, morfológica e eletromagnéticas.
- Capítulo 7: Conclusão da dissertação.
- Capítulo 8: Sugestões de trabalhos futuros.
- Apêndice A: São apresentadas as técnicas de caracterização da estrutura cristalina e morfológica.
- Anexo A: Descrição das tarefas para utilização do programa em linguagem Python.
- Anexo B: Ficha cristalográfica da ferrocarbonila do ICDD.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Breve história das microondas e ondas eletromagnéticas

Karl Friedrich Gauss (1777-1855), um matemático alemão, fez as primeiras tentativas de deduzir os fundamentos da lei da ação eletromagnética em termos de um campo elétrico propagando em velocidade finita, porém Michel Faraday (1848) deu início as micro-ondas e ondas eletromagnéticas com experimentos sobre propagação de distúrbios magnéticos, que mais tarde ficaram popularmente conhecido como equações de Maxwell (James Clerk Maxwell 1865) (CHATURVEDI, 2018). Guglielmo Marconi e Heinrich Rudolf Hertz em 1888 provaram através de seus experimentos, que a teoria de radiofrequência de Maxwell eram fenômenos eletromagnéticos e que a velocidade máxima de propagação no vácuo era igual a velocidade da luz ($c=3.10^8$ m/s).

Em 1885, Jagadish Chandra Bose desenvolveu um circuito para gerar potência de micro-ondas, em 1898 desenvolveu antena de corneta, polarizador e detector de sinal de radiofrequência, que é usado nos dias de hoje. As equações de Maxwell são o ponto de partida para os sistemas de micro-ondas e radiofrequência na tentativa de monitorar e quantificar os fenômenos das ondas eletromagnéticas. Na área de linhas de transmissão e transmissores o desenvolvimento foi lento, porém constante até 1930, após este período o crescimento foi constante (CHATURVEDI, 2018).

O início da propagação de micro-ondas através de guia de ondas, foi um feito do Dr. George Clark Southworth em 1933, quando ele foi capaz de transmitir sinal através de tubos de metal de quatro polegadas de diâmetro. Após a I e II Guerras Mundiais, o desenvolvimento de micro-ondas foi acelerado e se deu com a evolução de dispositivos de ferrita, tubo de onda móvel (TWT), etc., que surgiram na década de 1950, a evolução de micro-ondas se deu a partir de 1960 (CHATURVEDI, 2018).

Na década de 60, juntamente com os diodos vieram os transistores de micro-ondas, com características de ocupar um espaço muito pequeno e ter poucos requisitos de energia para a geração de micro-ondas. Atualmente a aplicação de micro-ondas encontra-se em todos os segmentos de comunicação e controle de telemetria (áudio, vídeo, texto e dados), seja para uso em sistemas civis, sistemas de defesa ou aplicações espaciais. Também está presente em outras aplicações, como processos industriais, eletrodomésticos, medicina e comunicação via satélite (CHATURVEDI, 2018).

2.2 Eletromagnetismo aplicado a MARE

Absorvedores de ondas eletromagnéticas podem absorver uma onda eletromagnética com base nos princípios de transformar energia da onda incidente em calor, ou cancelar mutuamente as fases entre a onda incidente e a onda refletida (JORDAN, 2013). A partir do desenvolvimento de vários tipos de absorvedores de micro-ondas, principalmente para aplicações em câmaras anecóicas, a maioria são compostos de materiais a base de carbono (JORDAN, 2013).

As propriedades elétricas e magnéticas dos materiais são caracterizadas pelos parâmetros ($\varepsilon' - j\varepsilon''$), ε (permissividade) e μ (permeabilidade). Os meios nos quais os fenômenos eletromagnéticos se processam por caracterizados no domínio da frequência são, ε , μ e σ (condutividade elétrica) (AMARAL JUNIOR, 2018).

A proximidade dos componentes de circuitos elétricos, faz com que a radiação eletromagnética de um componente induza algum campo ou tensão no outro componente, causando interferência. Esse tipo de campo pode ser reduzido protegendo os circuitos, com material absorvedor.

2.3 Equações de Maxwell

A região do espaço como os intervalos de tempo podem ser finitos ou infinitos em extensão. Todos os fenômenos eletromagnéticos podem ser descritos através de dois campos, o campo elétrico e o campo magnético. A teoria eletromagnética é uma teoria de campo, e cujas leis válidas são representadas pelas Equações de Maxwell (PEREIRA, 2007).

As equações de Maxwell estabelecem que a teoria de todos os fenômenos eletromagnéticos são compostas por quatro equações fundamentais do eletromagnetismo, que descrevem o comportamento de uma onda eletromagnética. São compostas por: lei de Gauss da eletricidade (Equação 2.1), do magnetismo (Equação 2.2), lei de Faraday (Equação 2.3) e lei de Amperes-Maxwell (Equação 2.4).

$$\oint_a \vec{D} \cdot \hat{n} da = \int_v \rho dv \quad (2.1)$$

$$\oint_S \vec{B} \cdot \hat{n} da = 0 \quad (2.2)$$

$$\oint_l \vec{E} \cdot \hat{n} dl = - \int_a \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot \hat{n} da \quad (2.3)$$

$$\oint_l \vec{E} \cdot \hat{n} dl = \int_a \vec{J} \cdot \hat{n} da + \int_a \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \cdot \hat{n} da \quad (2.4)$$

As equações 2.1, 2.2, 2.3 e 2.4 são apresentadas na forma integral, porém, é necessário transformá-las na forma diferencial aplicando o *Teorema do Divergente*. As equações de Maxwell na forma diferencial são mostradas abaixo:

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (2.5)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.6)$$

$$\nabla \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.7)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.8)$$

De acordo com as equações de Maxwell, pode-se dizer que campos elétricos variáveis geram mudanças nos campos magnéticos no espaço livre ou mudanças no campo magnético constituem variações nos campos elétricos e essas variações nos campos elétricos e magnéticos são perpendiculares entre si (COSTA F.; BORGESE, 2017). As relações características estabelecem ligações entre as funções vetoriais de campo e de densidade do campo. Os meios nos quais os fenômenos eletromagnéticos se processam são caracterizados no domínio da frequência por valores de permissividade (ϵ), permeabilidade (μ) e condutividade elétrica (σ). Os parâmetros ϵ e μ são constantes complexas características do meio onde se propaga a onda eletromagnética (AMARAL JUNIOR, 2018). Assim, têm-se as Equações (2.9, 2.10 e 2.11).

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (2.9)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2.10)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (2.11)$$

em que:

\vec{D} = densidade de fluxo do campo elétrico, em coulomb por metro quadrado;

\vec{E} = intensidade de campo elétrico, em volt por metro;

ε = permissividade, em faraday por metro;

\vec{B} = densidade de fluxo de campo magnético, em weber por metro quadrado;

μ = permeabilidade, em henry por metro;

\vec{J} = densidade de corrente elétrica, em ampère por metro quadrado;

σ = condutividade elétrica, em siemens por metro;

2.4 Propagação da onda eletromagnética em materiais

A onda eletromagnética propaga-se em uma direção perpendicular às componentes do campo elétrico e magnético propagando-se na direção positiva do eixo z, com \vec{E} na direção x e \vec{H} na direção y. A Figura 2.1, ilustra a propagação da onda eletromagnética.

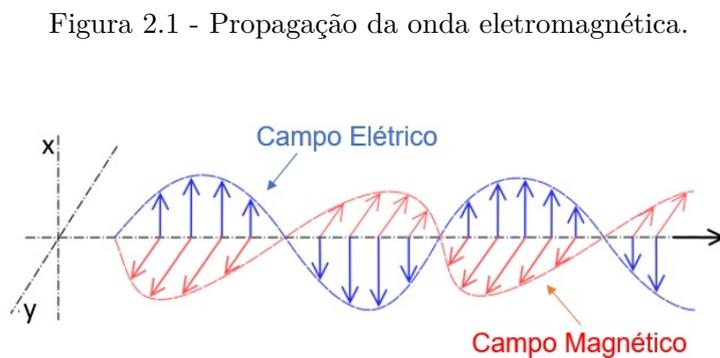


Figura 2.1 - Propagação da onda eletromagnética.

Fonte: Adaptado de Pereira (2007).

A onda eletromagnética tem comprimentos de onda λ diferentes, variando de acordo com a frequência, sendo que, $\lambda = c/f$. A medida que a frequência diminui, o comprimento de onda aumenta (ULABY, 2004). A propagação da onda eletromagnética em um meio é em função da permissividade e permeabilidade complexa deste meio (NOHARA, 2003).

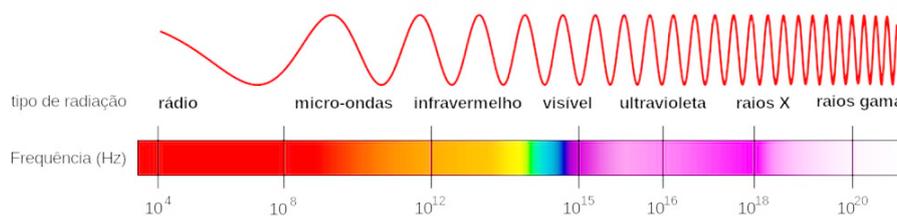
2.5 Propriedades eletromagnéticas dos materiais

O termo espectro eletromagnético corresponde à radiação eletromagnética para todas as frequências e a radiação eletromagnética é causada por fótons em movimento que carregam energia e agem tanto como ondas quanto como partículas. A primeira descoberta da radiação eletromagnética foi feita por William Herschel e a radiação eletromagnética foi correlacionada ao eletromagnetismo por Michael Faraday. Após esses desenvolvimentos, as leis fundamentais do eletromagnetismo foram propostas pela primeira vez por James Clerk Maxwell com expressões matemáticas (COSTA F.; BORGESSE, 2017).

$$c = \lambda \cdot f = 3.10^8 m/s \quad (2.12)$$

Onde (c) é a velocidade da luz conhecida, (f) é a frequência e λ é o comprimento de onda. A aplicação desta fórmula a todas as frequências resulta no espectro eletromagnético que pode ser visto na Figura 2.2.

Figura 2.2 - Espectro Eletromagnético.



Fonte: Adaptado Costa (2019).

As ondas eletromagnéticas podem ser produzidas por eventos naturais ou dispositivos eletrônicos e podem ser transmitidas de um ponto a outro no espaço. A

possibilidade das ondas eletromagnéticas completarem a transmissão depende da energia e do comprimento de onda das ondas. As medidas das componentes complexas da permissividade e da permeabilidade são importantes para pesquisas das características eletromagnéticas de materiais e para possibilitar aplicações científicas e industriais. Conhecendo-se estes parâmetros é possível inferir sobre as propriedades de absorção, além de se poder alterar a formulação do material para se obter o melhor desempenho.

Tendo em vista, que, no meio, não há cargas livres ($\rho = 0$) nem densidade de corrente de condução ($\vec{J} = 0$), as Equações 2.5, 2.6, 2.7 e 2.8 podem ser reescritas da seguinte forma:

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (2.13)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (2.14)$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0 \quad (2.15)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.16)$$

Para completar o conjunto das equações, é necessário conhecer as relações constitutivas do meio material, que contém a resposta do mesmo à aplicação dos campos \vec{E} (elétrico) e \vec{H} (magnético). Em materiais dielétricos, a aplicação de um campo elétrico \vec{E} causa a polarização dos átomos ou moléculas do material, criando dipolos elétricos que aumenta a densidade de fluxo D . Essa polarização adicional é denominada de Polarização Elétrica " Pe ". Assim, as relações abaixo estão escritas para o vácuo ϵ_0 e μ_0 . As equações tratam apenas de μ e ϵ .

$$D = \epsilon_0 \vec{E} + Pe \quad (2.17)$$

Para um meio linear, a polarização elétrica cresce linearmente com o campo elétrico externo aplicado.

$$Pe = \varepsilon_o X e \vec{E} \quad (2.18)$$

A grandeza Xe é denominada de susceptibilidade elétrica complexa do material e representa o grau de liberdade de giro dos dipolos elétricos no interior do material. Essa característica é uma propriedade de cada material em particular. Combinando as Equações 2.17 e 2.18.

$$D = \varepsilon_o E + Pe = \varepsilon_o(1 + Xe)E = \varepsilon E \quad (2.19)$$

Em que:

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' = \varepsilon_o(1 + Xe) \quad (2.20)$$

A Equação 2.20 é definida como a permissividade complexa do meio. A parte real é à constante dielétrica do material, enquanto a parte imaginária está relacionada a perda de energia devido à vibração do momento do dipolo no material. Um dielétrico que apresenta condutividade elétrica tem as mesmas características de um condutor com perdas (ou de condutividade finita). Em um material de condutividade ρ a densidade de condução de corrente satisfaz a Lei Vetorial de Ohm, ou seja,

$$J = \rho E \quad (2.21)$$

Para um campo harmônico o movimento do campo magnético H resulta em:

$$\nabla \times H = j\omega D + J \quad (2.22)$$

$$\nabla \times H = j\omega(\varepsilon' - j\varepsilon'' - j\frac{\rho}{\omega})E \quad (2.23)$$

Na Equação 2.22 é mostrado que a perda devido ao amortecimento dielétrico ($\omega \varepsilon''$) é separada da perda devido à condutividade ρ . O termo $(\omega \varepsilon'' + \rho)$ pode ser considerado como a condutividade efetiva total do material, que é relacionada à tangente de perdas do material. As polarizações elétrica e magnética dos campos

elétrico e magnético tendem a tardar, o que ocasiona perdas da onda no meio em que se propaga, assim, os parâmetros constitutivos ε_r e μ_r assumem valores complexos, apresentados nas Equações 2.26 e 2.27.

A permissividade e a permeabilidade são expressados em termos da ε_o e μ_o do espaço livre, sendo os termos ε_r e μ_r definidos como permissividade e permeabilidade relativa do meio.

$$\varepsilon = \varepsilon_o \varepsilon_r \quad (2.24)$$

$$\mu = \mu_o \mu_r \quad (2.25)$$

A propagação do campo eletromagnético em um meio é a função da permissividade elétrica (ε) e da permeabilidade magnética (μ) deste meio. Essas grandezas podem ser ilustradas nas Equações a seguir:

$$\varepsilon_r = \varepsilon'_r - j\varepsilon''_r \quad (2.26)$$

$$\mu_r = \mu'_r - j\mu''_r \quad (2.27)$$

onde:

ε_r = é a permissividade complexa relativa;

ε'_r = é a componente real da permissividade relativa complexa;

ε''_r = é a componente complexa da permissividade relativa complexa;

μ_r = é a permeabilidade complexa relativa;

μ'_r = é a componente real da permeabilidade relativa complexa;

μ''_r = é a componente complexa da permeabilidade relativa complexa, onde estes termos são adimensionais.

Os valores de ε_r e μ_r estão de acordo com os valores da permissividade e da per-

meabilidade no espaço livre (ϵ_0 e μ_0 respectivamente). As componentes reais das grandezas ϵ'_r e μ'_r estão relacionadas com a energia armazenada, enquanto a parte imaginária ϵ''_r e μ''_r estão relacionadas com as perdas. A componente real da permissividade complexa ϵ'_r é medida como a energia do campo externo, que é armazenada no material. A componente imaginária da permissividade complexa relativa ϵ''_r é a medida da energia dissipada, sendo que ϵ''_r é sempre maior que zero, e é geralmente muito menor que ϵ'_r (SADIKU, 2004).

2.5.1 Propriedades elétricas

Os materiais têm um comportamento característico de resistência ao fluxo de carga elétrica. Esta característica de resistir à corrente elétrica, é conhecida como resistência, representada pelo símbolo R . Entretanto, a resistência de qualquer material tendo uma área de seção transversal uniforme A , um comprimento L , e uma resistividade elétrica ρ , pode ser expressa através da Equação 2.28 (SADIKU, 2004) (COELHO FILHO, 2008).

$$R = \frac{\rho}{A} \quad (2.28)$$

Para um corpo cilíndrico de comprimento L e seção transversal de área A , define-se a resistividade elétrica ρ do material do qual o corpo é constituído por:

$$\rho = R \frac{A}{L} \quad (2.29)$$

2.5.2 Condutividade

A condutividade elétrica de um material é uma medida pela facilidade com que ele é capaz de conduzir uma corrente elétrica. Define-se a condutividade elétrica com sendo o inverso da resistividade:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (2.30)$$

A condutividade ρ do material é medida por siemens por metro $\frac{S}{m}$, e caracteriza-se como a facilidade com que as cargas (elétrons) possam se movimentar livremente no material (AMARAL JUNIOR, 2018).

2.5.3 Tangente de perda

A tangente de perda ($\tan\delta$) representa a razão entre a energia perdida e a energia armazenada por ciclo do campo externo aplicado. Considerando que não exista uma fronteira bem determinada entre bons condutores dielétricos e com perdas, $\tan\delta$ pode ser usada para quantificar as perdas em um meio (SADIKU, 2004). A tangente de perda pode ser expressada através da parte real (ε') e imaginária da permissividade do material (ε''), como pode ser visto na Equação 2.31, sendo a expressão para a parte magnética semelhante, Equação 2.32.

$$\tan\delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (2.31)$$

$$\tan\delta = \frac{\mu''}{\mu'} \quad (2.32)$$

Portanto, a energia absorvida é a componente da energia da onda eletromagnética que sofre a conversão da energia eletromagnética para a energia térmica, devido às propriedades dielétricas (permissividade complexa) e magnéticas (permeabilidade complexa) do material. Pelas propriedades dielétricas é definida a tangente de perdas, caracterizando o potencial de perda da energia, e esta é consequência da condutividade do material e da corrente de deslocamento em função da frequência (NOHARA, 2003). A partir das propriedades magnéticas é definida a tangente de perdas magnética, caracterizado pelos mecanismos de absorção devido ao alinhamento de magnetização dentro material. A energia absorvida está relacionada com a absorção intrínseca do material, ou seja, a magnitude da energia absorvida depende das tangentes de perdas dielétricas e magnéticas (REZENDE et al., 2003).

2.5.4 Propriedades magnéticas

A propriedade magnética de um material é determinada principalmente por seu momento magnético, que resulta da órbita e rotação dos elétrons. De acordo com as respostas do momentos magnéticos dos átomos em um determinado material, os materiais podem ser geralmente classificados em diamagnéticos, paramagnéticos, ferromagnéticos, ferrimagnéticos e antiferromagnéticos conforme a descrição a seguir (GHIONE; PIROLA, 2017).

- **Diamagnéticos:** Os elétrons em um material diamagnético, são pareados com spins antiparalelos, onde não há rede magnética. Quando um campo magnético externo é aplicado, as órbitas dos elétrons mudam, resultando em um momento magnético na direção oposta ao campo magnético aplicado. Observa-se que todos os materiais têm diamagnetismo, visto que, todos os materiais têm elétrons em órbita. No entanto, para material diamagnético, o spin dos elétrons não contribui para o magnetismo (GHIONE; PIROLA, 2017).
- **Paramagnéticos:** As orientações desses momentos magnéticos atômicos são aleatórias, devido ao elétron desemparelhado girando nos átomos. Quando não há campo magnético externo, esses momentos individuais são alinhados aleatoriamente, para que o material não mostre magnetismo macroscópico. Quando um campo magnético externo é aplicado, os momentos magnéticos são parcialmente alinhados ao longo da direção do campo magnético externo. Se o campo magnético aplicado é removido, o alinhamento desaparece imediatamente. Portanto, um material paramagnético é um material magnético apenas na presença de um campo magnético externo (GHIONE; PIROLA, 2017).
- **Ferromagnéticos:** Materiais ferromagnéticos exibem um momento magnético permanente na ausência de um campo magnético externo, ocorre quando a energia de interação entre os dipolos magnéticos é positiva, e possuem mesma direção e sentido. A energia associada é de natureza eletrostática, esta energia está sempre presente quando existe ferromagnetismo (EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (EEA), 2019).
- **Ferrimagnéticos:** Este tipo ocorre quando as interações são negativas, mas os momentos magnéticos, em sentidos opostos, não possuem valores iguais em módulo. Por ser aleatório as orientações dos domínios, o material não tem magnetismo macroscópico sem um campo magnético externo. Esses materiais são facilmente magnetizados e têm muitas das características dos materiais ferromagnéticos (GHIONE; PIROLA, 2017).
- **Antiferromagnéticos:** Ocorre quando a energia de interação é negativa e os momentos magnéticos em sentidos opostos são iguais em módulo. Metade dos dipolos se alinham em uma direção, e a outra metade se alinha na direção oposta, se os dipolos forem do mesmo tamanho se cancelam. Possuem baixa permeabilidade magnética (GHIONE; PIROLA, 2017).

A magnetização global, também chamada de comportamento magnético, é resultante do somatório dos momentos atômicos dos dipolos magnéticos no interior de sua estrutura. Estes dipolos estão presentes em cada elétron, devido a rotação em seu próprio eixo e sua rotação em torno do núcleo do átomo. Os spins magnéticos e o conjunto dos momentos magnéticos dos elétrons de um átomo são gerados através destas rotações, chamadas de domínios magnéticos, como pode ser observado na Figura 2.3.

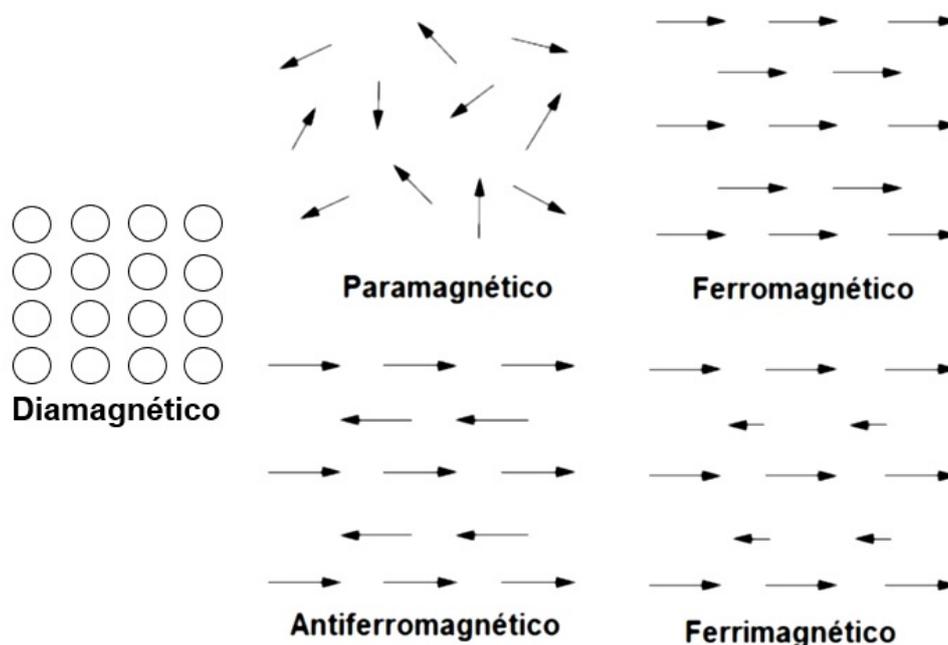
A capacidade de orientação das paredes e consequente magnetização do material é definida como susceptibilidade magnética χ_m . O somatório das direções e intensidades dos momentos magnéticos dos domínios dão origem ao comportamento magnético resultante do material. A Figura 2.4 apresenta arranjos de momentos magnéticos em vários materiais magnéticos.

Figura 2.3 - Representação de domínios magnéticos e a parede dos domínios.



Fonte: Adaptado Carter (2013).

Figura 2.4 - Arranjos de Momentos Magnéticos.



Fonte: Adaptado Ghione (2017).

2.6 Guia de onda

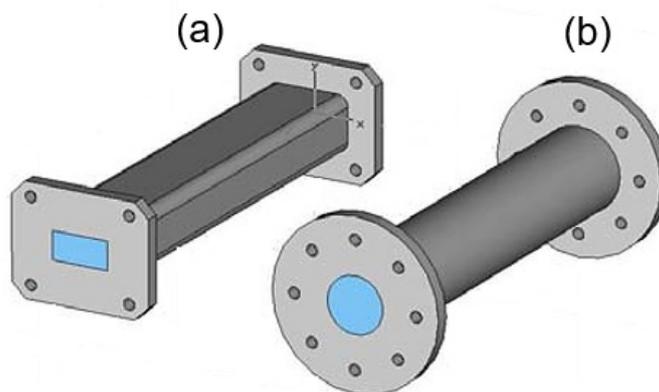
Guias de onda são estruturas constituídas basicamente de um determinado material ao longo de um eixo z caracterizados pelas grandezas de permissividade, permeabilidade e condutividade, sendo responsável por direcionar a energia eletromagnética que se propaga ao longo dos seus eixos. A energia direcionada ou conduzida, serve para o transporte de informações, e para que haja melhor eficiência é desejável que o mínimo de energia seja absorvido pela estrutura do guia (GURGEL, 2016). Os guias de ondas são usados para mover sinais de frequências muito altas em distâncias curtas e frequentemente para conectar uma antena de micro-ondas ao seu transmissor e receptor. São usados como opção à linha de transmissão de micro-ondas, sendo o recurso preferido para a transmissão e processamento para ondas eletromagnéticas de frequências mais altas. Os guias mais comuns são o retangular e o circular. São essenciais em outras aplicações, especialmente em casos onde há implementação de filtros de baixas perdas e com largura de banda reduzida, onde existe a dificuldade de encontrar parâmetros, em casos de implementação de componentes laboratoriais de

elevado desempenho, como defasadores e atenuadores variáveis, ou ainda em casos onde é necessário o transporte de sinal com baixa atenuação em sistemas que exigem elevada sensibilidade (GURGEL, 2016). Embora um guia de ondas possa propagar vários modos, na grande maioria dos casos são utilizados para propagar apenas o modo fundamental, por exemplo, TE_{10} em guia de ondas retangulares (REZENDE et al., 2003).

2.6.1 Tipos de guia de onda

Dependendo da sua aplicação os formatos dos guias de onda podem ser variados, onde, para cada desempenho é assumido um determinado formato (AMARAL JUNIOR, 2018). São ilustradas na Figura 2.5 alguns modelos de guia de ondas.

Figura 2.5 - Imagem de guias de ondas retangular (a) e circular (b).



Fonte: Adaptado Balanis (2016).

Ainda existem guias de onda com formatos mais complexos, guia elíptico, guia com saliência, guia dielétrico (fibra óptica), porém as geometrias mais utilizadas são a retangular e a circular. As dimensões dos guias de onda retangulares são padronizadas, existindo três nomenclaturas: EIA (Electronics Industry Association - EUA), com referência WR, IEC (International Electrotechnical Commission - Europeia), com referência R, a inglesa, com referência WG (IBBOTSON, 2004). A Tabela 2.1 apresenta as características de alguns guias de onda retangulares padronizados, listando a referência em dois padrões (europeu e americano), e a banda de operação.

Tabela 2.1 - Guias de onda retangulares.

WR (EIA)	Banda	WG (Europa)
90	X	16
62	Ku	18
42	Ka	19
28	K	20

2.6.2 Equação da Onda em Guias Retangulares

Com os campos de onda propagando-se no sentido positivo do eixo z , ou seja, admitindo que não há uma onda refletida, poderão ser escritos de acordo com a Equação 2.33:

$$\vec{E}(x, y, z) = \vec{E}(x, y)e^{-\gamma z} \quad (2.33)$$

$$\vec{H}(x, y, z) = \vec{H}(x, y)e^{-\gamma z} \quad (2.34)$$

Admitindo que todas as componentes cartesianas do campo eletromagnético ($E_x, E_y, E_z, H_x, H_y, H_z$) variem, sendo apenas funções de x e de y , as Equações são reescritas da seguinte forma:

$$\nabla_{xy}^2 \vec{E} + h^2 \vec{E} = 0 \quad (2.35)$$

$$\nabla_{xy}^2 \vec{H} + h^2 \vec{H} = 0 \quad (2.36)$$

onde h é uma constante dada pela equação abaixo:

$$h^2 = \gamma^2 + \mu\varepsilon \quad (2.37)$$

$$h^2 = \omega^2 \mu\varepsilon - \beta^2 \quad (2.38)$$

O termo $\nabla^2 xy$ é denominado laplaciano transversal, sendo dado pela equação a seguir:

$$\nabla^2 xy = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \quad (2.39)$$

O modo de propagação de ondas planas no interior de um guia de onda é descrito como modo transversal, no qual o campo elétrico e o campo magnético se propagam de maneira perpendicular, sendo classificados como modo transversal elétrico (TE), modo transversal magnético (TM), e modo transversal eletromagnético (TEM) (POZAR, 1998). Em guia de ondas é utilizado o modo dominante de propagação TE_{10} , modo fundamental. Para a determinação dos campos, deve-se proceder à resolução das Equações 2.33 e 2.35, para ondas TM e para ondas TE, respectivamente. A equação de onda permite a obtenção das componentes longitudinais Ez ou Hx , as Equações 2.35 e 2.36, possuem forma genérica, onde $\psi(x, y)$ é a função se pretende determinar Ez para os modos TM e Hx para os modos TE (POZAR, 1998).

$$\nabla_{xy}^2 \psi + h^2 \psi = 0 \quad (2.40)$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + h^2 \psi = 0 \quad (2.41)$$

As Equações 2.40 e 2.41, são definidas em derivadas parciais que podem ser resolvidas usando o método de separação de variáveis. Assumindo-se que $\psi(x, y) = X(x)Y(y)$, em que $X(x)$ e $Y(y)$ são funções a se determinar. Substituindo, essa solução nas equações citadas, dividindo ambos os membros por $(X(x)Y(y))$, é obtida a equação

$$\frac{1}{X(x)} \frac{\partial^2 X(x)}{\partial x^2} + \frac{1}{Y(y)} \frac{\partial^2 Y(y)}{\partial y^2} + h^2 = 0 \quad (2.42)$$

Conforme a equação, é possível verificar que a primeira parcela depende apenas de x , enquanto a segunda é só função de y , e a terceira é uma constante. Para satisfazer todos os valores x e y ($0 \leq x \leq a$) e ($0 \leq y \leq b$), é necessário que as primeiras duas parcelas sejam constantes (POZAR, 1998). Constituinte estas constantes por K_x^2 e K_y^2 , é possível escrever as equações da seguinte forma:

$$\frac{1}{X(x)} \frac{\partial^2 X(x)}{\partial x^2} + K_x^2 = 0 \quad (2.43)$$

$$\frac{1}{Y(y)} \frac{\partial^2 Y(y)}{\partial y^2} + K_y^2 = 0 \quad (2.44)$$

$$K_x^2 + K_y^2 = h^2 \quad (2.45)$$

As equações são diferenciais ordinárias lineares de segunda ordem e de coeficientes constantes.

$$\frac{\partial^2 X(x)}{\partial x^2} + K_x^2 X(x) = 0 \quad (2.46)$$

$$\frac{\partial^2 Y(y)}{\partial y^2} + K_y^2 Y(y) = 0 \quad (2.47)$$

A solução geral destas equações é dada pelas equações abaixo, em que A, B, C e D são constantes de integração.

$$X(x) = A \operatorname{sen}(K_x x) + B \operatorname{cos}(K_x x) \quad (2.48)$$

$$Y(y) = C \operatorname{sen}(K_y y) + D \operatorname{cos}(K_y y) \quad (2.49)$$

Por fim, é escrita a função $\psi(x, y)$ em termos de A, B, C e D e K_x e K_y , conforme a Equação abaixo:

$$\psi(x, y) = [A \operatorname{sen}(K_x x) + B \operatorname{cos}(K_x x)] \cdot [C \operatorname{sen}(K_y y) + D \operatorname{cos}(K_y y)] \quad (2.50)$$

2.6.3 Modo TE em guia de onda retangular

Nesta dissertação o modo de propagação adotado foi o TE_{10} , que apresenta campo magnético perpendicular a propagação e campo elétrico na direção de propagação da onda. O modo TE é caracterizado por possuir o campo H_z como única componente

na direção de propagação ($Ez = 0$). H_z é conhecido como a componente longitudinal (POZAR, 1998). A componente do campo magnético na direção de propagação H_z pode ser obtida através da resolução das equações de Helmholtz, com solução dada pela Equação 2.48. A determinação das constantes de integração para os modos TE não é imediata, já que as condições de contorno não podem ser aplicadas a H_z . As componentes transversais do campo elétrico Ex e Ey devem ser calculadas. Considerando $Ey=0$, temos as equações a seguir:

$$Ex = -\frac{j\omega\mu}{h^2}X(x)Y'(y) \quad (2.51)$$

$$Ey = -\frac{j\omega\mu}{h^2}X'(x)Y(y) \quad (2.52)$$

em que,

$$X'(x) = K_x[A\cos(K_x x)] - B\sen(K_x x) \quad (2.53)$$

$$Y'(x) = K_y[C\cos(K_y y)] - D\sen(K_y y) \quad (2.54)$$

Assim é possível a aplicação das condições de contorno, que são $Ey(x=0,y)=Ey(x=a,y)=0$ e $Ex(x,y=0) = Ex(x,y=b) = 0$. Essa informação nas expressões de $X'(x)$ e $Y'(y)$, estão indicadas nas Equações 2.51 e 2.52, entende-se que $X'(0)=X'(a)=0$ e que $Y'(0)=Y(b)=0$, assim a equação fica da seguinte forma:

$$A = 0 \quad (2.55)$$

$$B\sen(K_x a) = 0 \quad (2.56)$$

$$C = 0 \quad (2.57)$$

$$D\sen(K_y b) = 0 \quad (2.58)$$

automaticamente, é possível obter (com m e n valores inteiros):

$$K_x = \frac{m\pi}{a} \quad (2.59)$$

$$K_y = \frac{n\pi}{b} \quad (2.60)$$

$$X_x = B \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \quad (2.61)$$

$$Y_y = D \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \quad (2.62)$$

Desta forma, é possível escrever a componente longitudinal do campo magnético para o modo TE, onde H_{mn} é a amplitude de H_z .

$$H_z = H_{mn} \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \quad (2.63)$$

2.6.4 Frequência de corte

A caracterização eletromagnética possibilita determinar por meio de métodos numéricos, o comportamento das propriedades elétricas e magnéticas dos compósitos. Os guias de onda operam apenas em uma faixa de frequência, sendo necessário selecionar a frequência de trabalho. A frequência de corte (f_c) é estabelecida como uma estreita faixa de frequência em que a onda pode ser transmitida no guia apenas em um modo de propagação. A definição de frequência de corte é muito importante em guia de ondas, onde é determinada a frequência mínima a partir de um determinado modo a ser propagado (AMARAL JUNIOR, 2018). No guia de ondas retangular a frequência de operação é definida pela frequência de corte (f_c), calculada por:

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\varepsilon}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2} \quad (2.64)$$

onde (a) é a dimensão maior do guia de onda, (b) é a dimensão menor do guia e (m) e (n) assumem valores inteiros (0,1,2...). Desta forma, apenas um modo de propagação se faz presente, evitando a presença de modos de propagação simultâneos, sendo a

Equação 2.64, resumida como:

$$f_c = \frac{c}{2a} \quad (2.65)$$

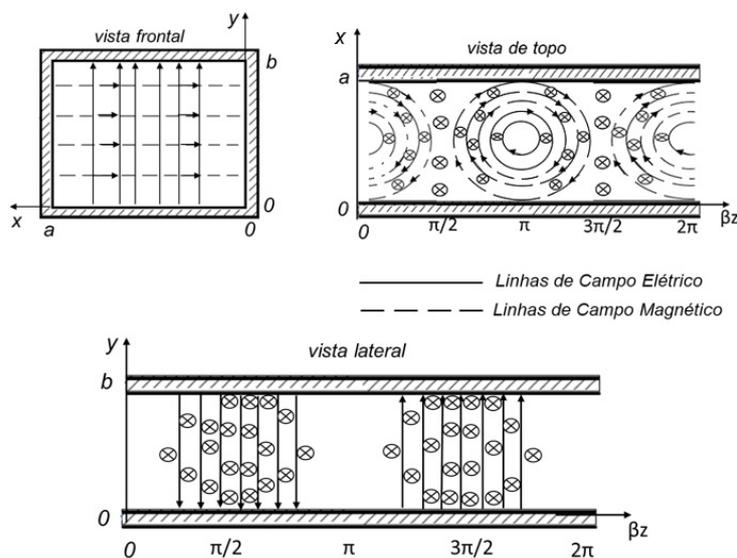
A Tabela 2.2 lista várias frequências de corte para vários guias de onda retangulares (ULABY, 2004).

Tabela 2.2 - Frequência de corte para guias de onda retangulares.

WR	Banda	f_c (GHz)
650	L	0,908
430	W	1,372
284	S	2,078
187	C	3,152
90	X	6,557
42	K	14,047
22	Q	26,342

Denomina-se o modo fundamental ou dominante, o modo que apresenta a menor frequência de corte. O modo fundamental nos guias de onda retangulares será o modo TE_{10} (tendo como convenção que $a > b$). Resumidamente, os modos TE_{mn} e TM_{mn} são caracterizados com base nos parâmetros: Frequência de operação; Dimensão do Guia; Características do dielétrico (ULABY, 2004). A Figura 2.6 mostra como se comportam as linhas de campo de diferentes perspectivas das seções do guia de onda retangular para o modo TE.

Figura 2.6 - Linhas de Campo para o Modo TE.



Fonte: Adaptado Panzo (2014).

2.7 Parametros-S

Na caracterização eletromagnética de materiais, os parâmetros S representam as energias da onda eletromagnética refletida e transmitida pelo material. Os parâmetros S por si só fornecem poucas informações sobre as propriedades do material em estudo no analisador de rede vetorial. É muito mais útil ter medições na dependência da frequência da permissividade e permeabilidade do material sendo estudado (FISCHER, 2008).

A matriz de espalhamento (matriz S) é uma construção matemática que quantifica como a onda eletromagnética se propaga por meio de uma rede multiportas. A matriz S para uma porta N contém coeficientes N^2 (parâmetros S), cada um representando um possível caminho de entrada-saída.

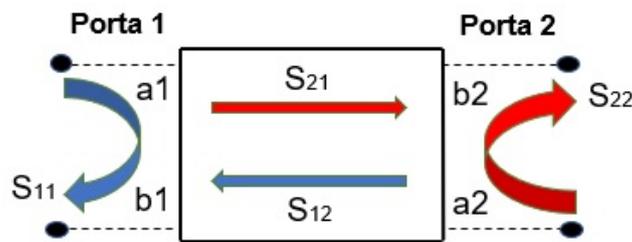
Os parâmetros de dispersão (parâmetros-S) auxiliam na análise, simulação e medição de dispositivos de micro-ondas.

Os parâmetros S são geralmente exibidos em formato de matriz, com o número de linhas e colunas igual ao número de portas. Para o parâmetros S (S_{ij}), o subscrito j representa a porta que está excitada (a porta de entrada) e o subscrito i é a

porta de saída. Os parâmetros ao longo da diagonal da matriz S são chamados de coeficientes de reflexão porque se referem apenas ao que acontece em uma única porta, enquanto os parâmetros S fora da diagonal são chamados de coeficientes de transmissão, porque se referem ao que acontece em uma porta quando é excitado por um sinal incidente em outra porta (HIEBEL, 2007).

Analisando um dispositivo com 2 portas, além da reflexão, relacionada com os parâmetros de reflexão (S_{11} e S_{22}), há a possibilidade da transmissão, relacionada com os parâmetros de transmissão (S_{21} e S_{12}). A Figura 2.7 mostra uma representação das possíveis reflexões e transmissões para um dispositivo com 2 portas.

Figura 2.7 - Representação de um dispositivo com duas portas, em que: S_{11} , S_{12} , S_{21} e S_{22} são parâmetros de espalhamento e a_1 , b_1 , a_2 e b_2 são respectivamente variáveis de entrada e saída.



Fonte: Produção do autor.

Os parâmetros de espalhamento (S_{11} , S_{12} , S_{21} e S_{22}), também conhecidos como parâmetros S , são definidos como a razão das respectivas quantidades de ondas. Para entender os parâmetros- S considere um caso simples, onde se tem uma onda incidente da porta 1 para porta 2, nesse caso, a onda incidente propaga-se da fonte de radiofrequência do analisador de redes para o dispositivo sob teste, e a onda refletida viaja de volta do dispositivo sob teste para o analisador. Logo, sob essas condições operacionais, é possível calcular o coeficiente de reflexão S_{11} na porta 1 e o coeficiente de transmissão S_{21} da porta 1 para (Equação 2.66) porta 2 (CHATURVEDI, 2018).

$$\begin{aligned} S_{11} &= \left. \frac{b_1}{a_1} \right|_{a_2=0} \\ S_{21} &= \left. \frac{b_2}{a_1} \right|_{a_2=0} \end{aligned} \quad (2.66)$$

A onda proveniente da porta 2 para a porta 1, ou seja $a_1 = 0$ e $a_2 \neq 0$, os parâmetros S são dados pela Equação 2.67.

$$\begin{aligned} S_{12} &= \left. \frac{b_1}{a_2} \right|_{a_1=0} \\ S_{22} &= \left. \frac{b_2}{a_2} \right|_{a_1=0} \end{aligned} \quad (2.67)$$

Uma outra forma de representar os parâmetros-S e suas respectivas ondas é a forma matricial, que resulta em uma notação mais compactada.

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (2.68)$$

Caso queira medir S_{11} , injeta-se um sinal na porta 1 e mede-se seu sinal refletido. Nesse caso, nenhum sinal é injetado na porta 2, então $a_2 = 0$ para quase todas as medições de parâmetro S, é injetado apenas um sinal de cada vez. Para S_{21} , é injetado um sinal na porta 1 e medido a potência do sinal resultante saindo da porta 2. Para S_{12} é injetado um sinal na porta 2 e medido a potência do sinal saindo da porta 1, e para S_{22} é injetado um sinal na porta 2 e medido seu sinal refletido (HIEBEL, 2007).

As magnitudes dos parâmetros S são apresentadas de duas maneiras, magnitude linear ou decibéis baseados em logaritmos (dB), a fórmula para decibéis, neste caso, é:

$$S_{ij}(dB) = 20 \cdot \log[S_{ij}(magnitude)] \quad (2.69)$$

Os parâmetros S também podem ser expressos em dB, como $20 \log_{10}$.

2.8 Permissividade e Permeabilidade

Os valores de permissividade ε e permeabilidade μ complexas auxiliam na compreensão dos fenômenos de absorção da radiação eletromagnética pelo MARE, fornecendo informações do comportamento destes materiais. Através destes parâmetros é possível entender as propriedades de absorção, otimizando, desta forma, a formulação do material para se obter maior desempenho.

2.8.1 Permissividade complexa

A permissividade elétrica está relacionada com as características dielétricas do material, sendo denominado dielétrico se tiver a capacidade de armazenar a energia de um campo elétrico externo. Um material dielétrico, por definição, é um isolante elétrico que pode ser polarizado na presença de um campo elétrico. A polarização pode ser descrita como o alinhamento de dipolos elétricos com o campo aplicado (CALLISTER; WILEY, 2002). A permissividade obtém-se pela unidade Faraday por metro $\frac{F}{m}$, onde a constante dielétrica no espaço livre ou no vácuo é obtida pela Equação 2.70.

$$\varepsilon = \varepsilon_0 = 8,854.10^{-12} \approx \frac{10^{-9} F}{36\pi m} \quad (2.70)$$

em que:

ε_0 = permissividade do vácuo, em Faraday por metro;

Já nos meios que não sejam vácuo, a permissividade relativa, conhecida como constante dielétrica, é definida como a relação entre a permissividade complexa ε^* e a permissividade do vácuo ε_0 , apresentada na Equação 2.71.

$$\varepsilon_r^* = \frac{\varepsilon^*}{\varepsilon_0} = \varepsilon_r' - j\varepsilon_r'' = \left(\frac{\varepsilon_r'}{\varepsilon_0}\right) - j\left(\frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon_0}\right) \quad (2.71)$$

ε_r^* = permissividade complexa relativa;

ε^* = permissividade complexa, em faraday por metro;

ε_0 = permissividade do vácuo;

ε_r' = componente real da permissividade complexa relativa;

ε_r'' = componente imaginária da permissividade complexa relativa;

ε' = componente real da permissividade complexa, em faraday por metro;

ε'' = componente imaginária da permissividade complexa, em Faraday por metro.

ε_r' é a componente real da permissividade complexa relativa, é medida como a energia do campo externo, que é armazenada no material. ε_r'' é a componente imaginária da permissividade complexa relativa, é a medida da energia dissipada, sendo que ε_r'' é sempre maior que zero, e é geralmente muito menor do que ε_r' (BALANIS, 2016). Observando um material absorvedor de radiação eletromagnética, considera-se que quanto maior é a componente imaginária da permissividade complexa, maiores são as perdas impostas à onda incidente. O sinal negativo da permissividade complexa ($\varepsilon_r' - \varepsilon_r''$) entende-se que o meio é dissipativo (REZENDE et al., 2003).

A condutividade e a permissividade complexa em MARE, não são constantes em toda a faixa de frequência. Esses parâmetros podem mudar com a frequência, temperatura, formulação, pressão e estrutura molecular dos materiais (NOHARA, 2003).

2.8.2 Permeabilidade complexa

A interação do material com o campo magnético é definido como permeabilidade complexa, ou seja, a capacidade do material de interagir como o campo magnético. A constante de interação do campo magnético com o meio, no espaço livre ou no vácuo, é dada pela Equação 2.72.

$$\mu = \mu_0 = 1,256.10^{-6} = 4\pi.10^{-7} \frac{H}{m} \quad (2.72)$$

μ = permeabilidade, em henry por metro;

μ_0 = permeabilidade do vácuo, em henry por metro;

A permeabilidade complexa relativa (μ_r^*) consiste da componente real (μ_r'), que representa o termo de armazenamento de energia e a componente imaginária que representa o termo de dissipação de energia (ULABY, 2004). A Equação 2.73 apresenta a permeabilidade complexa relativa (μ_r^*), que é a razão entre a permeabilidade complexa (μ^*) e a permeabilidade do vácuo (μ_0).

$$\mu^* = \frac{\mu^*}{\mu_0} = \mu'_r - j\mu''_r = \left(\frac{\mu'}{\mu_0}\right) - j\left(\frac{\mu''}{\mu_0}\right) \quad (2.73)$$

onde:

μ^* = permeabilidade complexa relativa;

μ_0 = permeabilidade do espaço livre, em Henry por metro;

μ'_r = componente real da permeabilidade complexa relativa;

μ''_r = componente imaginária da permeabilidade complexa relativa;

μ' = componente real da permeabilidade complexa, em Henry por metro;

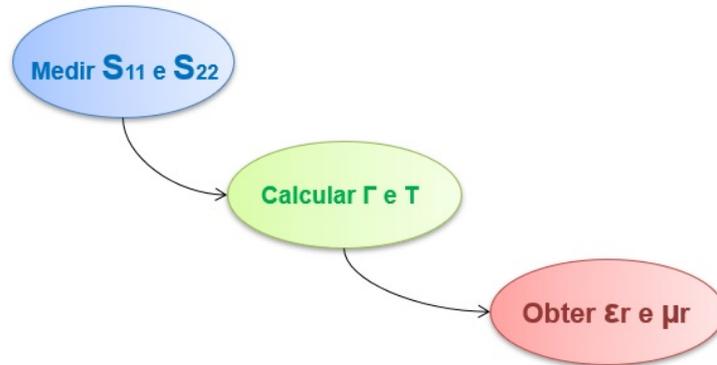
μ = componente imaginária da permeabilidade complexa, em Henry por metro;

O mecanismo natural de ressonância magnética está atribuído no comportamento de um absorvedor magnético. A ressonância magnética é o principal mecanismo de perda do material absorvedor (ULABY, 2004).

2.9 NRW - Método Nicolson Ross Weir

Nicolson e Ross e Weir desenvolveram um método para encontrar a permissividade e permeabilidade de uma amostra em função dos parâmetros S medidos. O método NRW (Nicolson Ross Weir) é baseado em medidas de reflexão (S_{11}) e transmissão (S_{22}) através de uma amostra homogênea de material isotrópico. Os valores complexos de permissividade e permeabilidade são obtidos em função da frequência de análise. Estas propriedades são necessárias para os cálculos de refletividade dos materiais (GHIONE; PIROLA, 2017). A Figura 2.8 apresenta um fluxograma resumido do método NRW.

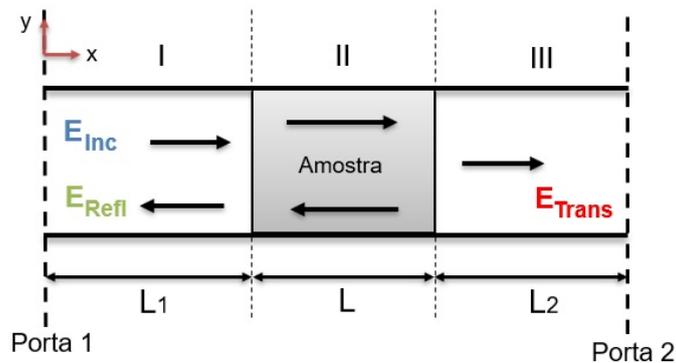
Figura 2.8 - Fluxograma do Método NRW.



Fonte: Produção do autor.

O método baseia-se em utilizar uma amostra inserida dentro do guia de onda, conectado à duas portas, e fazê-la interagir com uma onda eletromagnética incidente originada da porta 1, colhendo o sinal refletido e transmitido pelas porta 1 e 2 respectivamente (DUAN; GUAN, 2016) (BAKER-JARVIS, 1990). A Figura 2.9 mostra uma configuração de medida típica para um método de transmissão (T) e reflexão (Γ).

Figura 2.9 - Transmissão de ondas eletromagnéticas em uma amostra e interação com um campo elétrico.



Fonte: Produção do autor.

A amostra é inserida em um segmento de linha de transmissão, cujo eixo está na direção x . Presumindo os campos elétricos nas três seções da linha de transmissão E_1 , E_2 e E_3 dentro do guia de onda de modo de propagação TE, de acordo com a onda incidente, temos:

$$E_1 = e^{-\gamma_0 x} + C_1 e^{\gamma_0 x} \quad (2.74)$$

$$E_2 = C_2 e^{-\gamma x} + C_3 e^{\gamma x} \quad (2.75)$$

$$E_3 = C_4 e^{-\gamma_0 x} \quad (2.76)$$

$$\gamma_0 = 2\pi j \sqrt{\frac{1}{\lambda^2} - \frac{1}{\lambda_c^2}} \quad (2.77)$$

$$\gamma = \frac{2\pi j}{\lambda} \sqrt{\epsilon_r \mu_r - \frac{\lambda^2}{\lambda_c^2}} \quad (2.78)$$

Tabela 2.3 - Descrição do sistema sob análise.

Parâmetro	Descrição
L_1	Distância entre o plano de referencia 1 da Amostra e a porta 1
L	Distância entre o plano de referencia 1 e 2 da Amostra
L_2	Distância entre o plano de referência 2 da Amostra e a porta 2
\vec{E}_I	Campo elétrico incidente na interface da Amostra com o meio I
\vec{E}_R	Campo elétrico refletido na interface da Amostra com o meio I
\vec{E}_T	Campo elétrico transmitido na interface da Amostra com o meio III

em que, c é a velocidade da luz no vácuo, γ_0 e γ são a propagação constantes nas linhas de transmissão preenchidas com espaço e a amostra, respectivamente. As constantes C_i ($i = 1, 2, 3, 4$) nas Equações 2.74, 2.75 e 2.76 podem ser determinadas a partir das condições de contorno no campo elétrico e magnético, $j = \sqrt{-1}$, λ é o comprimento de onda e λ_c comprimento de onda de corte do guia

($\lambda_c = \frac{c}{f_c}$, onde f_c está representado na Tabela 2.2), ε_r e μ_r são as permissividade e permeabilidade relativas do vácuo (DUAN; GUAN, 2016).

Os parâmetros de dispersão para um dispositivo de duas portas, mostrado na Figura 2.9, pode ser obtido resolvendo as Equações 2.74, 2.75 e 2.76. A expressão é dada por:

$$S_{11} = R_1^2 \frac{\Gamma(1 - T^2)}{1 - \Gamma^2 T^2} \quad (2.79)$$

$$S_{21} = R_1 R_2 \frac{T(1 - \Gamma^2)}{1 - \Gamma^2 T^2} \quad (2.80)$$

onde R_1 e R_2 são as transformações do plano de referência em duas portas:

$$R_1 = e^{-\gamma_0 L_1} \quad (2.81)$$

$$R_2 = e^{-\gamma_0 L_2} \quad (2.82)$$

o coeficiente de reflexão Γ é dado por:

$$\Gamma = \frac{\frac{\gamma_0}{\mu_0} - \frac{\gamma}{\mu}}{\frac{\gamma_0}{\mu_0} + \frac{\gamma}{\mu}} \quad (2.83)$$

o coeficiente de transmissão T é dado por:

$$T = e^{-\gamma L} \quad (2.84)$$

O método NRW, também chamado de algoritmo NRW, é a combinação das Equações 5.1 e 5.2 derivadas para o cálculo de permissividade e permeabilidade, expressas pelos parâmetros de espalhamento S_{11} e S_{21} . O coeficiente de reflexão é dado por (DUAN; GUAN, 2016):

$$\Gamma = K \pm \sqrt{K^2 - 1} \quad (2.85)$$

onde K é expressado em termo dos parâmetros-S:

$$K = \frac{S_{11}^2 - S_{21}^2 + 1}{2S_{11}} \quad (2.86)$$

A escolha correta do sinal positivo ou negativo na Equação 2.85 é feita exigindo $|\Gamma| \leq 1$. O coeficiente de transmissão T é dado por:

$$T = \frac{S_{11} + S_{21} - \Gamma}{1 - (S_{11} + S_{21})\Gamma} \quad (2.87)$$

Portanto, a permeabilidade e a permissividade são calculadas como:

$$\mu_r = \frac{1 + \Gamma}{(1 - \Gamma)\Lambda \sqrt{\frac{1}{\lambda_o^2} - \frac{1}{\lambda_c^2}}} \quad (2.88)$$

$$\varepsilon_r = \frac{\lambda_o^2}{\mu_r} \left[\frac{1}{\lambda_c^2} - \left[\frac{1}{2\pi L} \ln(T^{-1}) \right]^2 \right] \quad (2.89)$$

onde o termo Λ representa o comprimento de onda, equivale a:

$$\Lambda = j \frac{L}{2\pi \ln(T^{-1})} \quad (2.90)$$

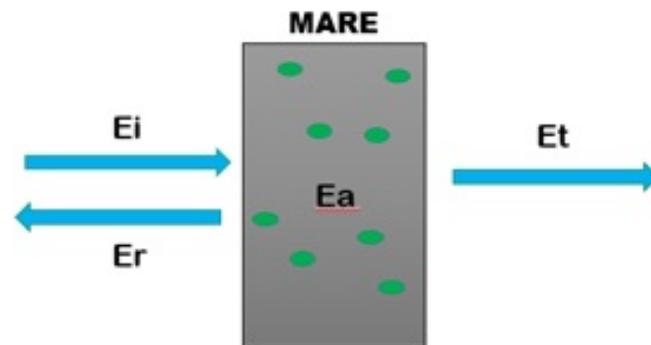
A utilização de materiais homogêneos, isotrópicos e dielétricos é ideal para o cálculo do método NRW, porém, o método pode apresentar incertezas nos valores de permissividade em função da frequência, quando S_{11} ou S_{22} apresentarem valores próximos de zero. Espaços de ar entre o condutor interno e a amostra, ou entre o condutor externo e a amostra causa uma redução da permissividade medida, devido ao baixo valor de permissividade em relação ao ar. Isso ocorre se houver um espaço entre a amostra e o condutor interno, onde o campo elétrico é mais intenso neste ponto. A posição e a dimensão da amostra é necessária no cálculo de permissividade e permeabilidade no método NRW (DUAN; GUAN, 2016).

2.10 Reflexão e Transmissão

Quando uma onda eletromagnética interage com dois meios distintos, pode ocorrer reflexão e transmissão. Esses fenômenos estão diretamente ligados à variação da

impedância do meio (η), que, dependendo da situação poderá ocorrer apenas reflexão, transmissão ou ambas simultaneamente. Uma transmissão perfeita só é possível quando ambos os meios possuem um casamento de impedância, ou seja, impedâncias equivalentes (KEYSIGHT, 2020). Para a faixa de radiofrequência, as perdas acontecem devido ao efeito joule, onde ocorre a dissipação de energia em forma de calor no interior do material. A caracterização eletromagnética de MARE está esquematizada na Figura 2.10, e envolve a determinação da energia transmitida (E_t) e da energia refletida (E_r) permitindo realizar o cálculo da energia absorvida (E_a) pelo material, (E_i) energia incidente, representa o total da energia emitida pelo equipamento.

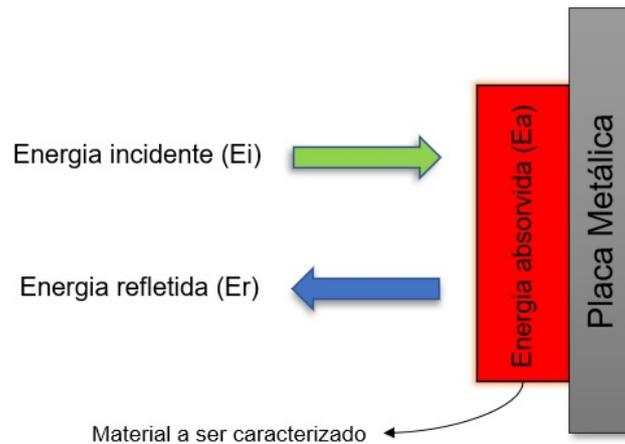
Figura 2.10 - Esquema ilustrativo do efeito de interação da onda como o MARE.



Fonte: Produção do Autor.

A caracterização eletromagnética, abrange a avaliação do coeficiente de reflexão com uma placa metálica sob o material, tendo como referência o sinal refletido pela placa metálica sem aplicação de material absorvedor, com isto, avaliar a capacidade do material absorvedor. Com isso, avalia-se a capacidade do material absorvedor (Figura 2.11) diminuir a energia refletida (E_r) (NOHARA, 2003).

Figura 2.11 - Esquema da conservação de energia com placa metálica



Fonte: Produção do Autor.

2.10.1 Refletividade

O desempenho dos MARE é geralmente caracterizado pela refletividade. A refletividade é a relação entre a energia eletromagnética refletida e a energia incidente no material. A atenuação da refletividade é medida em dB. Esta relação entre atenuação e a energia absorvida por um material pode ser vista na Tabela 2.4 (REZENDE et al., 2003), sendo que a eficiência de um material absorvedor é a medida de refletividade. Desta forma, o parâmetro refletividade é um indicador qualitativo do quanto este material pode refletir as ondas eletromagnéticas considerando as propriedades intrínsecas do material (WANG et al., 2011).

Tabela 2.4 - Relação da refletividade em dB com a porcentagem de energia absorvida.

Atenuação da radiação (dB)	Absorção da radiação incidente (%)
0	0
-3	50
-10	90
-15	96,9
-20	99
-30	99,9
-40	99,99

De acordo com a teoria de linha de transmissão, a perda por reflexão (RL) também conhecida como refletividade, pode ser calculada a partir do valor de impedância do material, Z_{in} , e da impedância característica do ar. A impedância do material é calculada com base na permissividade relativa complexa, através da Equação 2.91.

$$Z_{in} = Z_0 \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \tanh\left(\frac{2j\pi f d \sqrt{\mu_r \epsilon_r}}{c}\right) \quad (2.91)$$

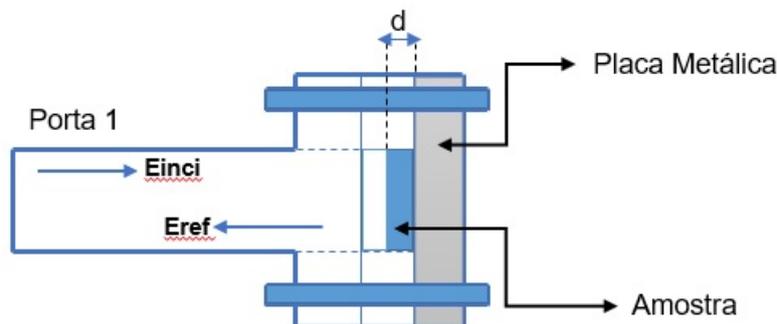
Onde ϵ_r e μ_r são permissividade e permeabilidade relativa, f é a frequência de micro-ondas, d é a espessura do absorvedor, c é a velocidade da luz no espaço livre, e $Z_0 = 50 \text{ Ohm}$ é a impedância característica da linha de transmissão. Sendo assim, a refletividade é calculada em decibéis utilizando-se a Equação 2.92.

$$RL(dB) = 20 \log_{10} \left| \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \right| \quad (2.92)$$

onde Z_{in} é a impedância de entrada entre o espaço livre e interface de material e Z_0 representa a impedância característica do vácuo.

A configuração da refletividade usa uma placa metálica na parte traseira da porta 1, para que não ocorra transmissão, apenas reflexão, sendo o plano de referência a porta 1, como representado na Figura 2.12.

Figura 2.12 - Representação esquemática da medida de refletividade no guia de onda.



Fonte: Produção do Autor.

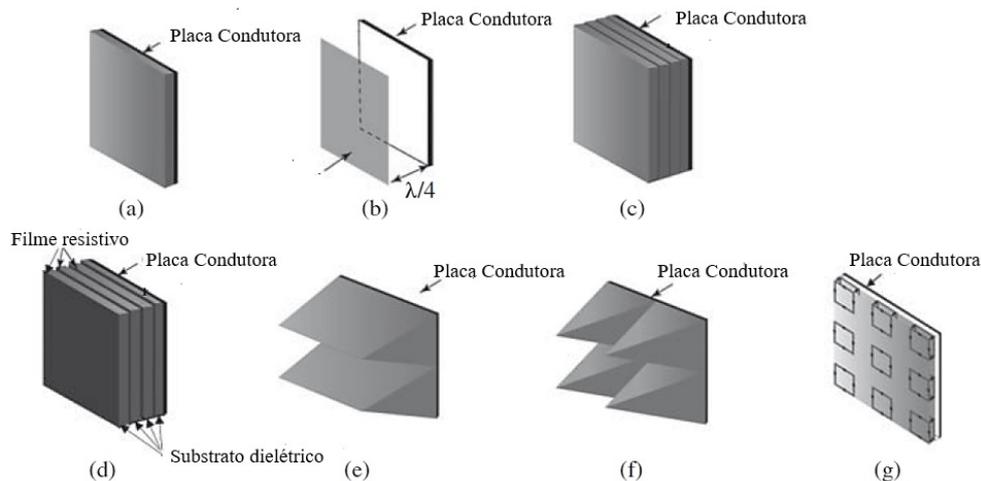
E_{ref} representa a energia refletida e E_{inci} representa a energia incidente. A relação entre a atenuação em dB e a porcentagem da radiação eletromagnética absorvida (energia absorvida pelo material) é apresentada na Tabela 2.4.

2.11 Fundamentos e características dos absorvedores

O absorvedor de onda ideal é capaz de absorver todas as ondas eletromagnéticas incidentes, independentemente da direção, polarização e frequência. Em outras palavras, é um objeto que não causa nenhuma onda de reflexão (JORDAN, 2013).

Neste trabalho, o absorvedor caracterizado é do tipo magnético, que interage com o campo magnético da onda eletromagnética incidente, podendo ser confeccionado na forma de multicamadas, utilizando-se diferentes camadas. Como é bem conhecido, os absorvedores de ondas eletromagnéticas são classificados de acordo com vários fatores, como a estrutura, o material a ser usado e a banda de frequência a ser aplicada. A Figura 2.13 mostra os absorvedores de acordo com sua aparência (JORDAN, 2013). Principais classificações de absorvedores:

Figura 2.13 - Tipos de Absorvedores, (a) plano, (b) $\lambda/4$, (c) multicamada, (d) Jaumann, (e) dente de serra, (f) piramidal e (g) tipo metamaterial.



Fonte: Adaptado Jordan (2013).

Um absorvedor de onda do tipo quarto de onda é construído colocando uma placa

condutora em uma posição a um quarto de comprimento de onda de distância do resistor em forma de filme. Um absorvedor Jaumann consiste em uma configuração em folhas resistivas e placas dielétricas sobrepostas. O absorvedor dente de serra, possui a característica de forma cônica, com polarização única, sendo possível absorver em uma ampla banda de frequência de forma eficiente. O absorvedor piramidal absorve as ondas eletromagnéticas em ampla faixa de frequência. Este absorvedor é feito através de impregnação de espuma, isopor ou material semelhante juntamente com material de carbono. Absorvedores multicamadas são construídos por camadas dos materiais absorvedores para obter a característica correspondente ajustando a impedância de entrada para cada material.

2.12 Simulação eletromagnética

A simulação computacional ganha cada vez mais importância na Engenharia, tendo como característica prever comportamento de diversos materiais, em diferentes campos, como por exemplo, mecânica, elétrica, eletrônica. Atualmente o uso de ferramentas computacionais é cada vez mais frequente em materiais absorvedores de radiação eletromagnética, sendo essencial para o desenvolvimento de pesquisas e de novas técnicas e caracterização dos mesmos (PAULA, 2010). A simulação é capaz de otimizar todo o processo de desenvolvimento, uma vez que permite testar o projeto antes da montagem em si, o que reflete em uma economia de custo, tempo e recursos.

A aplicação de materiais em diferentes áreas como aeroespacial, engenharia de micro-ondas, microeletrônica, indústria de telecomunicações, efeitos biológicos da radiação eletromagnética, entre outras, requer o conhecimento dos parâmetros de permissividade elétrica e permeabilidade magnética. As informações sobre estes parâmetros permite antecipar o comportamento dos materiais por intermédio da simulação computacional (PAULA, 2010). Através dos parâmetros de espalhamento obtidos por meio das medidas no analisador de rede vetorial, o algoritmo Nicolson-Ross-Weir (NRW) é utilizado para determinar os valores de permissividade e permeabilidade complexas dos materiais, em determinada faixa de frequência. Portanto, através dos parâmetros-S, é utilizado um software específico (85071E - Agilent) baseado no método de NRW (AMARAL JUNIOR, 2017).

Nos últimos anos, o Python se tornou uma linguagem dominante no campo do desenvolvimento científico de software, que possui pacotes de código aberto, que fornecem ferramentas essenciais, como estruturas de *array*, rotinas de plotagem, que possuem um conjunto básico que está em constante evolução, como por exemplo as bibliotecas: *numpy*, *scipy*, *pandas*, *matplotlib* e *jupyter*.

Este trabalho utilizou como ferramenta computacional um software com linguagem de programação Python, que possui linguagem de sintaxe relativamente simples, com bibliotecas livres e de fácil compreensão.

As linguagens funcionam da seguinte forma: um algoritmo é descrito em um arquivo usando a sintaxe permitida pela linguagem. Esse arquivo é denominado como arquivo fonte, pois é a partir de seu conteúdo que o programa de computador é gerado. A Figura 2.14 apresenta o funcionamento das linguagens compiladas.

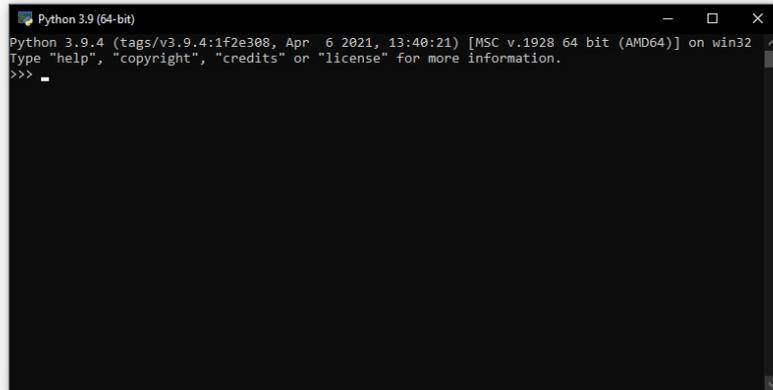
Figura 2.14 - Funcionamento das linguagens compiladas.



Fonte: Produção do Autor.

O Python pode trabalhar como linguagem interpretada, assim, o prompt da linguagem oferece um interpretador pronto a receber comandos e executá-los, como pode ser observado na Figura 2.15.

Figura 2.15 - Prompt de comando do Python.



Fonte: Produção do Autor.

É possível abrir o interpretador por meio de um editor de código-fonte para utilização no sistema operacional Windows. Neste trabalho foi utilizado o editor de código fonte gratuito chamado Visual Studio Code (VSCoDe). A Figura 2.16 apresenta a tela inicial do programa em linguagem Python.

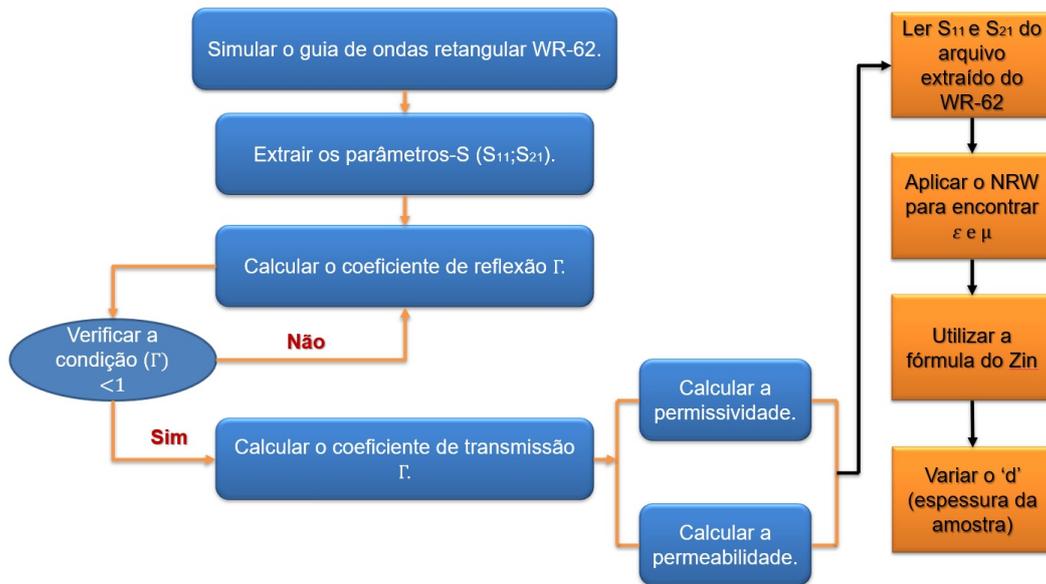
Figura 2.16 - Tela inicial do programa no editor VSCoDe.

```
1  from __future__ import division
2  import matplotlib.pyplot as plt
3  import numpy as np
4  import scipy.integrate as si
5  from matplotlib.widgets import Slider, Button, RadioButtons
6  #from matplotlib.ticker import MultipleLocator
7  import os
8
9  """
10  1-) Ler S11 e S21 do arquivo txt
11  2-) Aplicar o NRW para encontrar e and u
12  3-) Utilizar a Fórmula do Zin
13  4-) Variar o d, apenas para fórmula do Zin
14  """
```

Fonte: Produção do Autor.

A seguir é apresentado através de um fluxograma (Figura 2.17) a rotina de cálculo utilizada para testar o programa em linguagem Python ¹. O valor teórico dos parâmetros-S foram obtidos através das Equações 5.1, 5.2, 2.81 e 2.82.

Figura 2.17 - Fluxograma das etapas do programa.



Fonte: Produção do Autor.

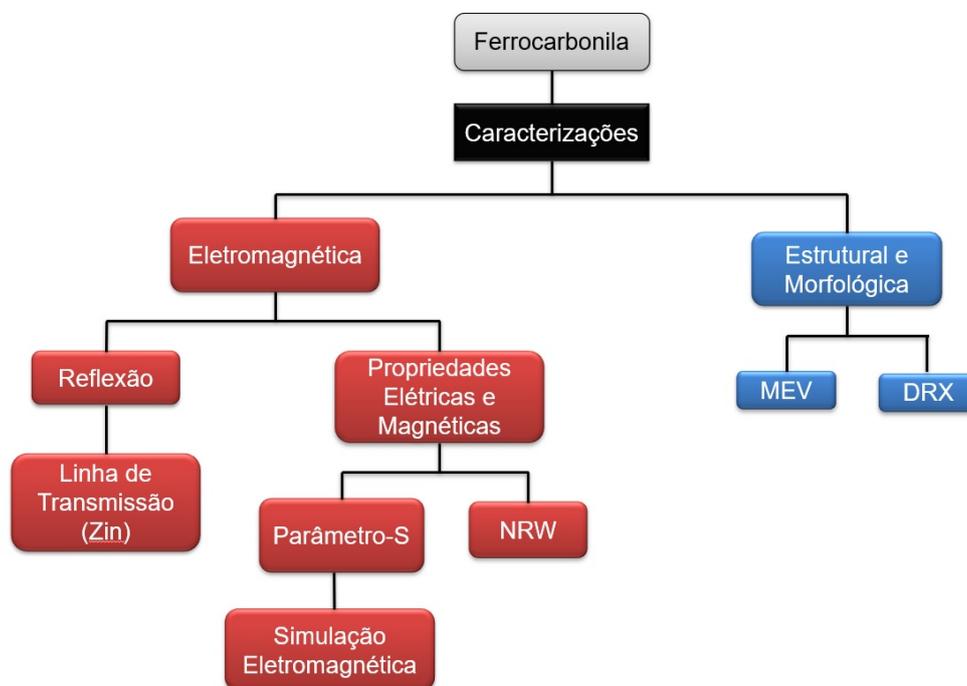
¹O código fonte do programa é apresentado na seção Anexo.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Fluxograma da dissertação

Para melhor entendimento e compreensão deste trabalho, este tópico busca mostrar de forma resumida todo o processo de obtenção das amostras e caracterização discutidos até aqui com o objetivo de ajudar o leitor a se organizar antes de entrar no capítulo de resultados e discussões. Na Figura 3.1 é mostrado o fluxograma com todos os passos realizados nesta dissertação.

Figura 3.1 - Fluxograma da dissertação.



Fonte: Produção do autor.

Primeiramente foi realizada caracterização estrutural e morfológica da ferrocarbonila, posteriormente o desenvolvimento do compósito, e por fim a caracterização eletromagnética.

3.2 Materiais

A obtenção, preparo e caracterização das amostras consiste em uma importante etapa do projeto. São abordados tópicos relacionados aos equipamentos, acessórios e materiais utilizados para confeccionar os corpos-de-prova. A escolha do aditivo magnético FC, foi baseada em resultados disponibilizados na literatura. A grande maioria dos trabalhos na literatura ((FENG et al., 2007), (FOLGUERAS et al., 2010)), utilizam a ferrocarbonila embutida nos mais variados tipos de matrizes.

3.2.1 Ferrocarbonila

Devido à sua propriedade ferromagnética a ferrocarbonila (FC) tem recebido atenção especial nas crescentes pesquisas realizadas no ramo de MARE (Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética).

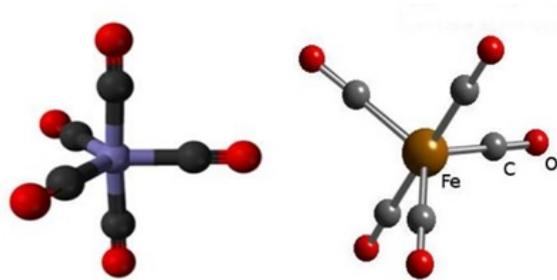
A ferrocarbonila é constituinte de propriedades ferromagnéticas que permitem a sua aplicação em diversas áreas, desta forma na área aeronáutica e espacial é utilizada na produção de MARE. Este material apresenta geralmente a composição de ferro, carbono e nitrogênio. O ferro é o principal elemento de sua composição total, assim permitindo que o material possua propriedades magnéticas. Além disso, também há outras diversas aplicações como no setor de eletroeletrônicos e na área de saúde, na qual é utilizada como suplemento alimentar; outrossim, a FC também é usada na produção de algumas ferritas, como por exemplo, absorvedores magnéticos e na fabricação de núcleos magnéticos para bobinas (FRIEDERANG; SCHLEGEL, 1999). Segundo a BASF, a FC é produzida a partir da decomposição térmica do complexo metálico ferropentacarbonila $Fe(Co)_5$ (FRIEDERANG; SCHLEGEL, 1999).

A Ferrocarbonila possui registro CAS 7439-89-6 ¹, sendo o registro para o elemento químico ferro, com porcentagem em massa de ferro acima de 97%. A Ferrocarbonila é comercializada na forma de pó, com partículas na forma, aproximadamente, esférica e tamanho de partícula entre 3-20 μm , massa específica de 7,8 g/cm^3 e com presença dos elementos químicos nitrogênio (0,01% - 1% em massa) e oxigênio (0,2 - 0,7% em massa) na sua composição química (FRIEDERANG; SCHLEGEL, 1999), (BAHADOOR et al., 2005).

Na Figura 3.2 é mostrado a representação tridimensional da ferropentacarbonila.

¹Ficha de Informação de Segurança de Produto Químico.

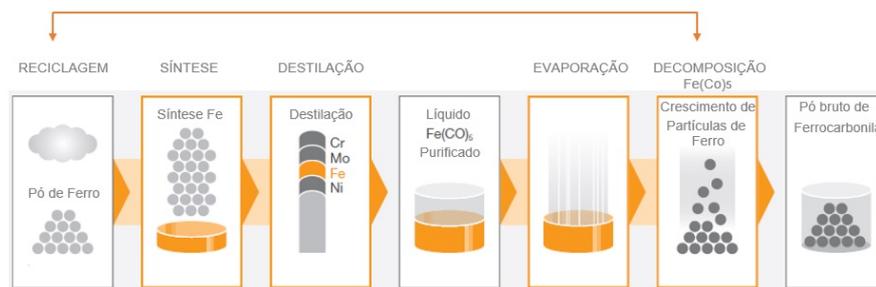
Figura 3.2 - Estrutura da Ferropentacarbonila $Fe(CO)_5$.



Fonte: Adaptado Rodrigues (2010).

A partir do processo de alta purificação intermediária, a BASF na Alemanha, sintetiza a ferropentacarbonila por meio de um processo de alta purificação intermediária, representado na Figura 3.2 (FRIEDERANG; SCHLEGEL, 1999). Em seguida é realizada a decomposição térmica deste mesmo material, representado na Figura 3.3, onde se obtém as partículas esféricas de ferrocobonila. A Figura 3.4 apresenta o processo final da ferrocobonila.

Figura 3.3 - Processo de Purificação da Ferropentacarbonila.



Fonte: Adaptado BASF (2019).

Figura 3.4 - Processo Final da Ferrocarbonila.



Fonte: Adaptado BASF (2019).

A ferrocarbonila sintetizada pela BASF apresenta propriedades diferenciadas quando comparada com ferrocarbonila produzida por processos metalúrgicos, como por exemplo, partículas esféricas com diâmetros entre 1-8 micrômetros, ausência de poros nas partículas, baixo teor de impurezas metálicas, controle do teor do carbono dentro do controle de qualidade (FRIEDERANG; SCHLEGEL, 1999).

As propriedades de alguns materiais, estão diretamente associadas à sua estrutura cristalina. A ferrocarbonila é composta basicamente pelo ferro na estrutura Ferro- α , de estrutura cúbica de corpo centrado, na qual, a rede cúbica de corpo centrado é uma rede que existe um átomo em cada vértice e um átomo no centro do cubo, como pode ser observado na Figura 3.5.

Figura 3.5 - Estrutura CCC da Ferrocarbonila.



Fonte: Adaptado Callister (2002).

A FC utilizada neste trabalho é de origem industrial, obtida comercialmente da empresa BASF, Alemanha. É um pó de ferro com pureza em torno de 99,8%, tipo EW-I ² revestido em sílica (SiO₂) que é uma classe não reduzida, que tem todas as partículas completamente revestidas com sílica (FRIEDERANG; SCHLEGEL, 1999). A BASF produz uma variedade de pós de ferrocobonila, pós não reduzidos (duros) e pós reduzidos (macios) que são revestidos com sílica. A função da sílica é ajudar a minimizar as correntes parasitas em aplicações eletromagnéticas, bem como melhorar a fluidez do pó. Pode-se observar na Figura 3.6 o pó de FC.

Figura 3.6 - Pó de Ferrocobonila.



Fonte: Adaptado BASF (2020).

3.3 Matriz resina Epóxi

O termo 'resina epóxi' é aplicado aos pré-polímeros após a cura. A resina epóxi é um material isolante e não magnético, sendo transparente às micro-ondas, comercialmente disponível sob uma enorme gama de variedade, com propriedades diversificadas, é geralmente aplicada com um segundo componente, designado comercialmente como endurecedor e tecnicamente como agente de cura (ELLIS, 1993).

O desenvolvimento de materiais para revestimento de ambientes é um dos fatores que contribuem para o crescimento comercial da resina epoxi. A procura por produtos de alto desempenho tem aumentado a demanda da indústria de revestimento e tintas, a busca por materiais com propriedades desejáveis, tais como: aparência, resistência à corrosão e durabilidade tem sido a primordial para o desenvolvimento de compósitos à base de resina epóxi. Resinas epóxi curadas exibem excelente adesão a um grande número de substratos, excelente isolamento elétrico e estabilidade térmica, além da

²É o padrão de resistência da FC, este tipo possui aplicação em frequência acima de 10MHz.

resistência à corrosão. O termo epóxi refere-se a um grupo constituído por um átomo de oxigênio ligado a dois átomos de carbono, sendo que o grupo epóxi mais simples consiste em um anel de três elementos conhecido como 1,2-epoxi, enquanto os termos 1,3 e 1,4-epóxi são aplicados aos óxidos de trimetileno (oxetano) e tetrametileno (tetrahydrofurano) (ELLIS, 1993). A Figura 3.7 ilustra o grupo epóxi mais simples com 2, 3 e 4 átomos de carbono e oxigênio como heteroátomo.

Figura 3.7 - Grupo Epóxi.



Fonte: Adaptado Ellis (1993).

Em resumo, apresentam grande adesividade, resistência à abrasão e baixa contração após cura. Devido ao baixo custo, são amplamente utilizadas na forma líquida, semi-sólida ou sólidas em função do peso molecular.

A matriz polimérica utilizada para obtenção do corpo de prova MARE, foi do tipo resina epóxi comercialmente distribuído pela empresa Hunstaman, tipo branca. A escolha desta matriz polimérica foi devido a boa resistência térmica e propriedades dielétricas, que consiste em oferecer resistência à passagem de corrente elétrica, e também por possuir a capacidade de armazenar energia elétrica, devido ao deslocamento de cargas (polarização) sob efeito de um campo elétrico (PEREIRA, 2007). A Figura 3.8 mostra a matriz polimérica, epóxi.

Figura 3.8 - Matriz Polimérica Resina Epocast.



Fonte: Adaptado Huntsman (2020).

3.4 Desenvolvimento do absorvedor

Os corpos de prova foram preparados em duplicata, para as medidas de permissividade e permeabilidade na faixa de 12,4 a 18 GHz. A preparação dos corpos de prova MARE seguiu as seguintes etapas:

- pesar a matriz polimérica em massa (g) em uma balança analítica.
- pesar o aditivo magnético (FC) com variação de 60%, 70% e 80% em relação a matriz epóxi. A variação de concentração utilizada foi conforme pesquisa bibliográfica que mostra valores significativos de atenuação nestas concentrações.
- adicionar o catalisador ao compósito, sendo este 0,05% da mistura FC + resina epóxi em (g).
- misturar manualmente de forma homogênea o compósito gerado.
- adicionar o compósito gerado em um molde para guia de ondas na Banda-Ku com dimensões de 15,8 x 7,95 x 6,5 mm.

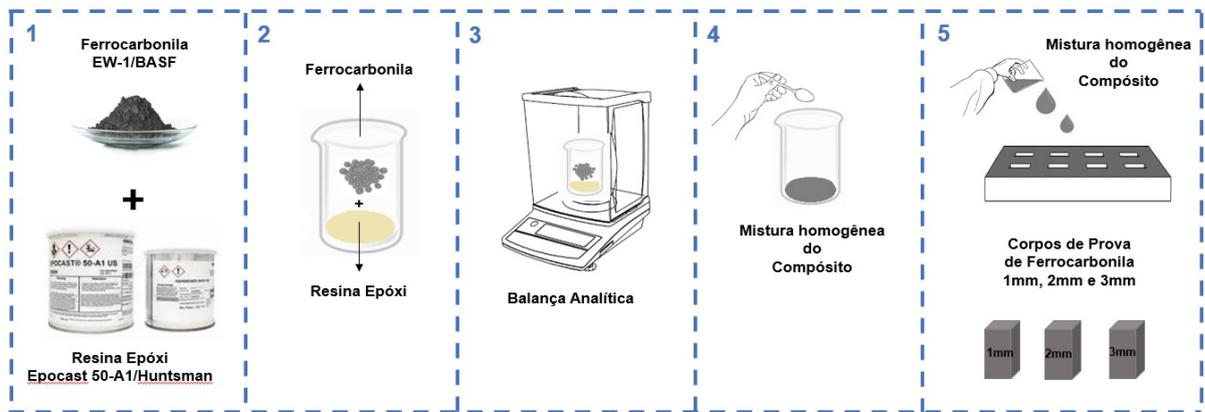
Através da Equação 3.1 é determinada a quantidade em gramas do aditivo magnético, e a equação 3.2 mostra a proporção de catalisador adicionada ao compósito.

$$FC(g) = (FC_g) \cdot \frac{Resina\%}{FC\%} \quad (3.1)$$

$$Catalisador[g] = (Resina[g]) \cdot (0,05) \quad (3.2)$$

A Figura 3.9 mostra um esquema ilustrativo da etapa envolvida no processamento do compósito epóxi e FC, e a Figura 3.10 ilustra o molde confeccionado por impressão 3D para a preparação dos corpos de prova.

Figura 3.9 - Esquema Ilustrativo da confecção dos compósitos.

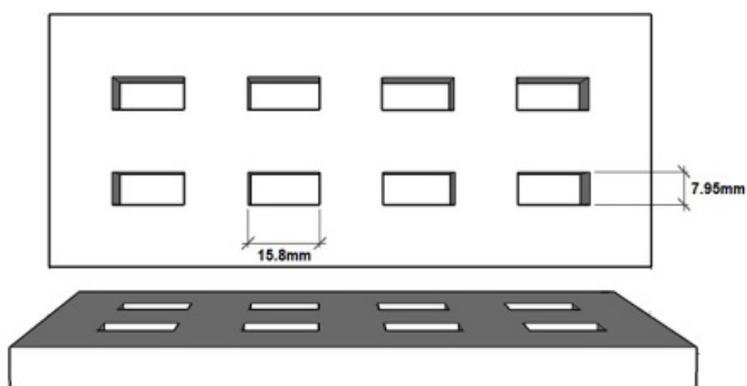


Fonte: Produção do Autor.

A cura do compósito ocorre em temperatura ambiente no período de 24h. Após o tempo de cura é necessário corrigir imperfeições nos corpos de prova gerado para a caracterização eletromagnética. A correção destas imperfeições pode ser feita utilizando uma lixa comum, procurando retirar com cuidado as imperfeições das amostras. É importante ressaltar que a confecção do molde dentro das dimensões corretas, é essencial para que não ocorra estas imperfeições após a cura do material.

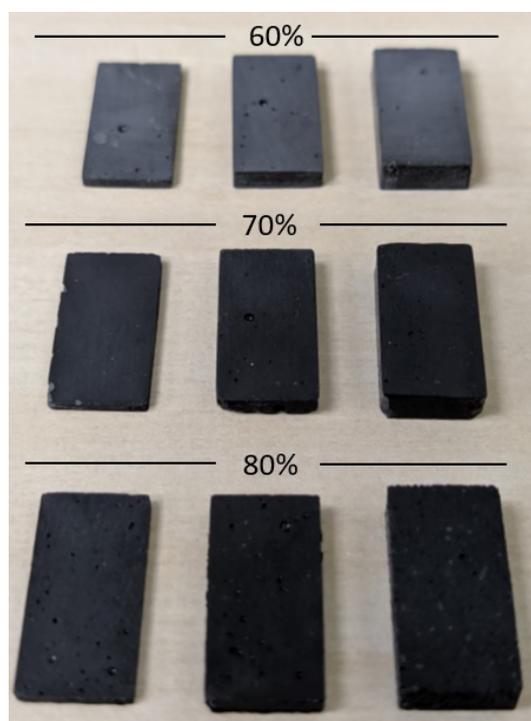
Neste trabalho estudou-se a variação da concentração de FC em massa em três concentrações 60%, 70% e 80%, e espessuras de 1 mm, 2 mm e 3 mm. As amostras são mostradas na Figura 3.11.

Figura 3.10 - Molde utilizado para a confecção dos corpos de prova para a caracterização eletromagnética.



Fonte: Adaptado de Amaral Junior 2018.

Figura 3.11 - Imagem das amostras produzidas com diferentes concentrações de FC.



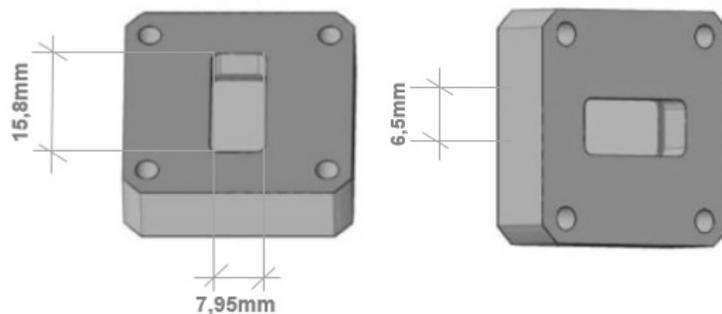
Fonte: Produção do Autor.

3.5 Métodos

3.5.1 Caracterização eletromagnética

As características eletromagnéticas de um material determinam o comportamento das ondas eletromagnéticas que incidem no mesmo. O conhecimento da permissividade relativa (ϵ_r), permeabilidade magnética relativa (μ_r), a condutividade, e fator de perdas dielétricas, são essenciais para se determinar o coeficiente de reflexão (Γ) através de um analisador de rede vetorial, do tipo guia de onda, onde são obtidos através dos parâmetros-S. Os corpos de prova foram produzidos com espessuras de 1 mm, 2 mm e 3 mm com dimensões de 7,95x15,8 mm (medidas do *offset*) como pode ser observado na Figura 3.12.

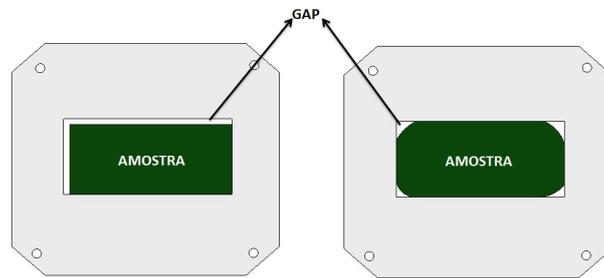
Figura 3.12 - Dimensão do offset do guia de ondas da Banda-Ku.



Fonte: Produção do Autor.

É necessário que não haja imperfeições dimensionais nos corpos de prova, isso ocasionaria erro na medida de permissividade e permeabilidade do material. Tais erros de dimensão são chamados na literatura de "GAP". Porém, o software da Agilent 85071E tem a opção de incluir o tamanho do GAP, que é geralmente observado nas extremidades das amostras, minimizando o erro ao calcular a permissividade e permeabilidade do material. Os defeitos dimensionais podem ocorrer de diversas formas, desde o manuseio, tempo de cura inadequado, entre outros. A Figura 3.13 mostra o efeito GAP.

Figura 3.13 - Ilustração de amostras com imperfeições dimensionais em relação ao *offset*.



Fonte: Produção do Autor.

4 TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL E MORFO-LÓGICA

4.1 Difratometria de raios-X

O fenômeno da difração de raios X (DRX) envolve a interação entre a radiação eletromagnética e a matéria. Em resumo, envolve a análise da diferença no caminho percorrido por raios difratados por diferentes planos adjacentes de uma estrutura cristalina. Para a ocorrência da difração é necessário que o comprimento de onda da radiação incidente seja da mesma ordem de grandeza dos espaçamentos interatômicos do material analisado, ou seja, da ordem de angstrom (10^{-10}m). A incidência de raios X sobre um átomo provoca o espalhamento de radiação em todas as direções; porém, a interferência construtiva da radiação espalhada proveniente de vários átomos caracteriza a difração. A condição para obter uma interferência construtiva é dada pela lei de Bragg, segundo a qual, quando raios X encontram um material cristalino, são difratados pelos planos atômicos dentro do cristal. O ângulo de difração θ depende do comprimento de onda λ dos raios X e da distância d entre os planos de tal forma que as interferências construtivas, obedecem a equação 4.1 (CULLITY; STOCK,):

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (4.1)$$

A difratometria analisa qualitativamente informações relacionadas com a estrutura cristalina e as propriedades do material, além de ser uma técnica não-destrutiva. Sendo assim, é uma técnica de caracterização estrutural muito utilizada para caracterizar materiais cristalinos.

Por meio desta técnica é possível identificar as fases de um material policristalino, determinar as quantidades relativas destas fases pelas intensidades dos picos de difração, bem como descobrir a orientação cristalográfica de cada pico (índice de Miller). Para caracterizar a estrutura cristalina foi utilizado um Difratometro de Raio X (DRX) modelo X'Pert PRO da empresa PanAnalytic utilizando um eletrodo de Cobre - Cu $K\alpha$ com comprimento de onda de $1,56 \text{ \AA}$.

4.2 MEV/FEG

Para a formação de imagens na microscopia eletrônica de varredura, são necessários elétrons secundários e elétrons retroespalhados. Conforme o feixe de elétrons vai

varrendo a amostra, estes sinais sofrem modificações de acordo com as variações da superfície. Os elétrons secundários fornecem imagem de topografia de superfície da amostra e são os responsáveis pela obtenção das imagens de alta resolução, já os retroespalhados fornecem imagem característica de composição (PORPINO et al., 2011).

A principal função do microscópio de varredura eletrônico (MEV) é na produção de uma imagem de aparência tridimensional varrendo em linhas paralelas a superfície de uma amostra com um feixe muito fino de elétrons de energia variável, em geral de 10 a 50 keV. Assim, a forma e o tamanho dos acidentes topográficos na superfície de uma amostra sólida podem ser visualizados com uma resolução e riqueza de detalhes impossíveis de serem alcançados em um microscópio óptico. É um instrumento muito versátil e usado comumente para análise microestrutural dos materiais, podendo também analisar a seção de corte transversal da amostra, permitindo verificar detalhes de contorno de grão, diferenciação de fases, trincas e interface (AMARAL JUNIOR, 2018).

Para caracterização morfológica, os compósitos de ferrocarbonila foram posicionados no equipamento utilizando uma fita de carbono condutora. Não foi necessário a metalização do material, que é um processo utilizado para a melhoria da qualidade das imagens.

5 TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO ELETROMAGNÉTICA

Os parâmetros complexos ε e μ dos materiais absorvedores de radiação eletromagnética desta dissertação, foram avaliados utilizando um analisador de redes vetorial como mostrado na Figura 5.1.

Figura 5.1 - Analisador de Rede Vetorial.



Fonte: Produção do Autor.

Foi utilizado o método de guia de onda, também conhecido como linha de transmissão, para medir os compósitos de ferrocarbonila. Este método consiste na emissão de uma radiação eletromagnética em determinada faixa de frequência, que se propaga através do guia de ondas até o compósito (amostra). A análise da radiação refletida e transmitida é realizada através dos parâmetros de espalhamento, parâmetros S, que são definidos entre a razão da onda incidente e da onda refletida.

Conforme mencionado no Capítulo 2, parte da radiação é enviada pela porta 1, é refletida pela amostra (S11) e a outra parte é transmitida através da amostra (S21). O procedimento análogo foi realizado na porta 2, onde parte da radiação foi refletida para a porta (S22) e parte foi transmitida para a porta 1 (S12). Para melhor entendimento, pode-se fazer o seguinte resumo:

$$S_{11} = \frac{\text{Potência Refletida na Porta 1}}{\text{Potência Incidente na Porta 1}} \quad (5.1)$$

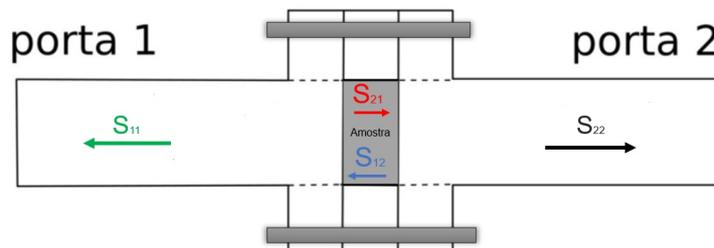
$$S_{21} = \frac{\text{Potência Transmitida na Porta 2}}{\text{Potência Incidente na Porta 1}} \quad (5.2)$$

$$S_{22} = \frac{\text{Potência Refletida na Porta 2}}{\text{Potência Incidente na Porta 2}} \quad (5.3)$$

$$S_{12} = \frac{\text{Potência Transmitida na Porta 1}}{\text{Potência Incidente na Porta 2}} \quad (5.4)$$

A Figura 5.2 apresenta um diagrama esquemático de um dispositivo de duas portas.

Figura 5.2 - Diagrama esquemático de um dispositivo de duas portas representando os parâmetros de espalhamento.



Fonte: Produção do Autor.

Os parâmetros constitutivos dos corpos de provas foram estudados na faixa de frequência de 12,4 - 18 GHz (Banda-Ku) através da conexão VNA / Cabo / Guia de onda Retangular. O guia de onda retangular usado para este propósito foi o WR-62 (P11644A Agilent ¹) com o seu respectivo cabo coaxial flexível 7 mm (85132F - Agilent) de 50 Ω com conexão APC-7 na extremidade. A Figura 5.3 mostra o Kit P11644A.

¹A empresa Agilent Technologies atualmente é conhecida como Keysight Technologies.

Figura 5.3 - Kit Agilent P11644A.



Fonte: Produção do Autor.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

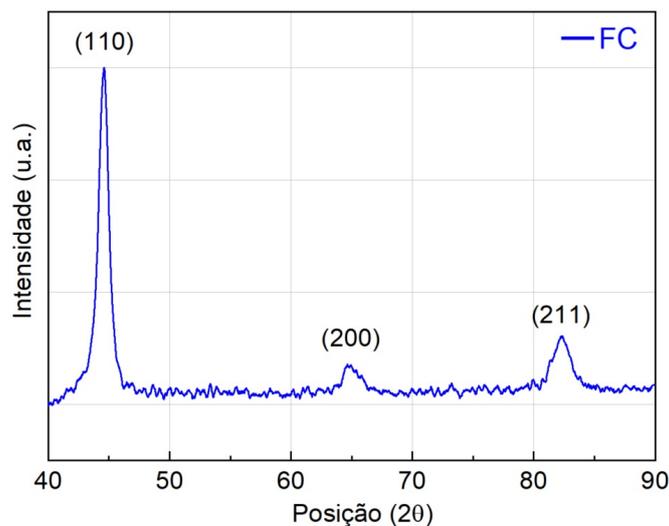
6.1 Caracterização estrutural e morfológica

Neste capítulo são apresentadas as técnicas de caracterização estrutural e morfológica. A partir da microscopia eletrônica de varredura (MEV/FEG) foi possível observar se houve variação da morfologia, como poros e defeitos. A caracterização estrutural foi realizada pela técnica de difração de Raios-X, onde foi possível obter informações relacionadas a estrutura cristalina da ferrocarbonila.

6.2 Difratomia de raios-X

A análise de DRX da FC confirmou a rede cristalina cúbica, a Figura 6.1 apresenta o difratograma da FC. Foi utilizado o equipamento PANalytical, da série X'PertPRO, e o método de análise foi o do pó, que é utilizado para a determinação de estruturas cristalinas em mono e policristais. O material apresenta picos bem definidos associados aos planos cristalinos (110), (200) e (211), os quais foram observados nas posições angulares em $2\theta = 44,6^\circ$, $64,9^\circ$ e $82,3^\circ$, respectivamente. Todos os picos estão relacionados à fase α -Fe da FC, conforme ficha padrão ICDD 006-0696. Os parâmetros da análise foram de: tensão 40kV, corrente 20mA, passo 0,02s, tempo/passos 15s.

Figura 6.1 - Difratomia de Raios-X da Ferrocarbonila.



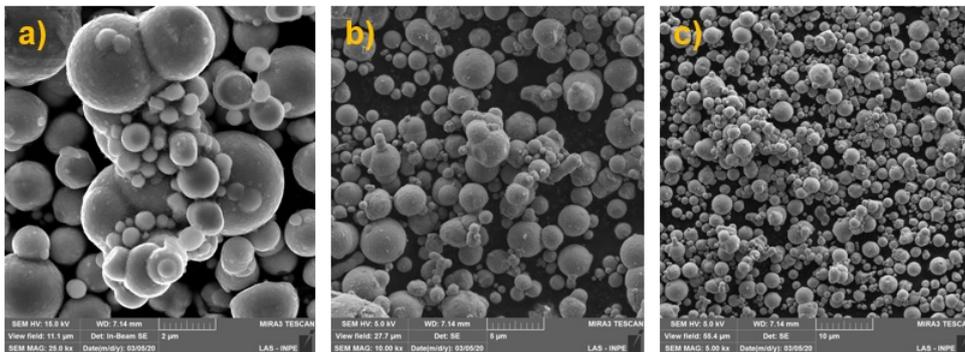
Fonte: Produção do Autor.

Através do difratograma é possível concluir que não houve a formação de nenhum outro pico referente a qualquer outra fase cristalina (FENG et al., 2007). A ficha cristalográfica referente a análise do difratograma da ferrocarbonila é apresentada no Apêndice C.

6.3 Microspia eletrônica de varredura (MEV/FEG)

A morfologia da ferrocarbonila foi observada através da microscopia eletrônica de varredura com canhão de emissão por campo (MEV-FEG), sendo utilizado um microscópio modelo MIRA3 da TESCAN. As imagens MEV/FEG são apresentadas na Figura 6.2. Foram obtidas em magnitudes de aumentos de (a) 25000x (b) 10000x e (c) 5000x. O pó de FC é um material que possui morfologia esférica e com tamanho médio de partículas variando entre 1 e 3 μm . Verifica-se uma agregação não uniforme das partículas na forma esférica.

Figura 6.2 - Micrografias da Ferrocarbonila.



Fonte: Produção do Autor.

6.4 Caracterização eletromagnética

Com objetivo de obter um material absorvedor de radiação eletromagnética à base de resina epóxi e FC, foram produzidas amostras com diferentes concentrações e com três espessuras. A seguir são apresentadas as medidas de permeabilidade e permissividade para a faixa de frequência (12,4 a 18,0 Ghz).

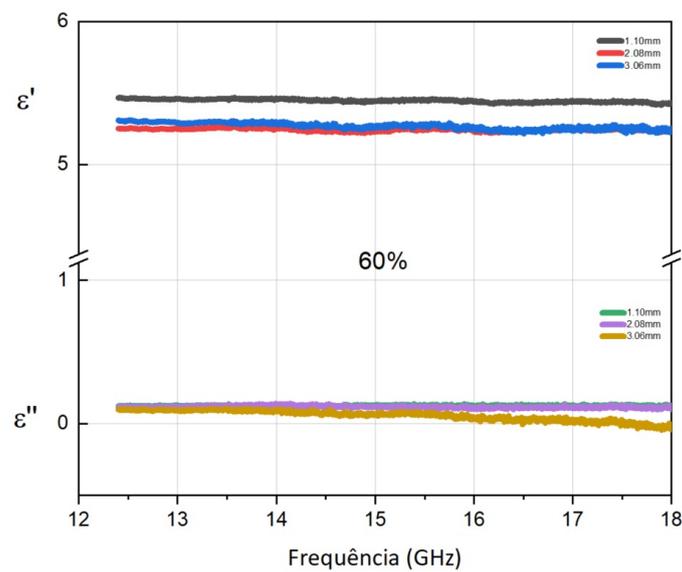
6.4.1 Permissividade e Permeabilidade

São descritos abaixo, as curvas de permissividade e permeabilidade complexa dos compósitos com concentrações de 60%, 70% e 80% nas espessuras de 1 mm, 2 mm e 3 mm.

6.4.2 Permissividade

Nas Figuras 6.3, 6.4 e 6.5 estão apresentadas as curvas de permissividade real e imaginária das amostras com concentrações de 60%, 70% e 80% de FC, respectivamente. De acordo com os gráficos, é possível observar uma variação significativa nos valores da permissividade real, que exibe um aumento em função da concentração e da espessura, sendo isto uma característica do aditivo magnético, que também pode estar associado ao caminho médio que a onda eletromagnética percorre no meio material, ou seja, mais dipolos elétricos a serem orientados e conseqüentemente maior valor de permissividade real.

Figura 6.3 - Permissividade dos Compósitos de 60%.

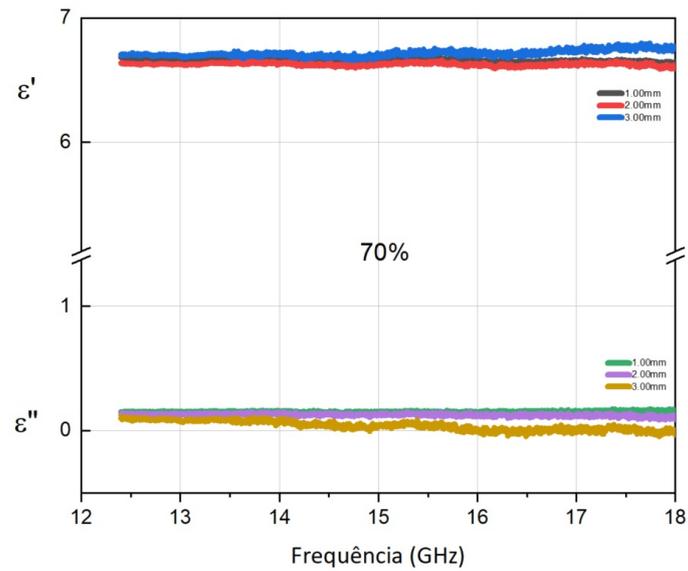


Fonte: Produção do Autor.

É importante destacar que estes valores apresentaram um comportamento praticamente linear em função da frequência. Este mesmo comportamento também é

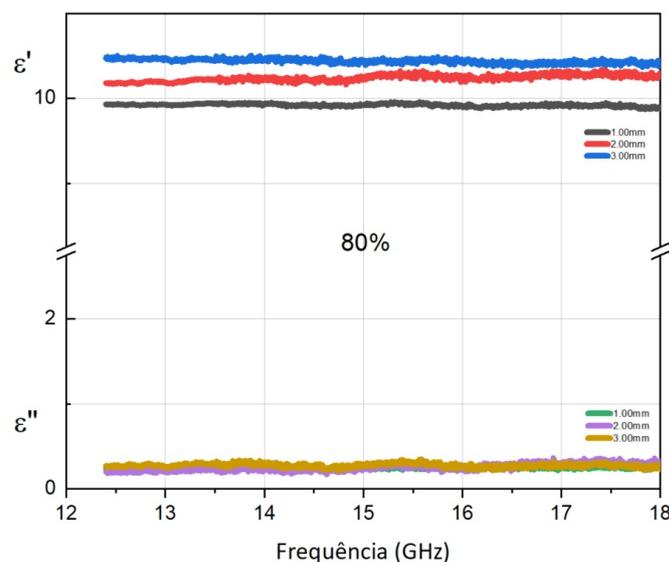
observado nos valores da permissividade imaginária, na qual, para todas as concentrações os valores se encontram em 0,1, o que indica que o material apresenta uma dissipação de energia quase que desprezível nestas condições. Na Tabela 6.1 são mostrados os valores médios da permissividade real e imaginária para as diferentes concentrações de FC.

Figura 6.4 - Permissividade dos Compósitos de 70%.



Fonte: Produção do Autor.

Figura 6.5 - Permissividade dos Compósitos de 80%.



Fonte: Produção do Autor.

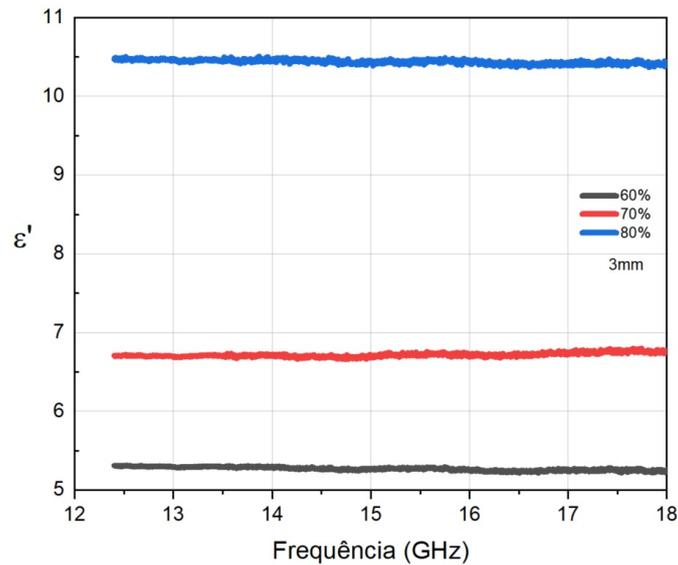
Tabela 6.1 - Valores médios de ϵ' e ϵ'' para as três concentrações de FC

Concentração	ϵ'	ϵ''
60%	5,5	0,1
70%	6,7	0,1
80%	10,2	0,1

Os valores obtidos para a permissividade real e imaginária das amostras estão de acordo com os autores (HONGFEI et al., 2015) e (DANG et al., 2003).

Analisando o gráfico da Figura 6.6, é possível observar na parte real, um aumento em função da concentração. Quanto maior a concentração mais significativo é este aumento. Para todas as concentrações apresentadas na espessura de 3 mm, ϵ' é praticamente linear em função da frequência (KULESHOV et al., 2019). A variação da concentração resultou em um pequeno aumento na parcela capacitiva da ferrocárbonila.

Figura 6.6 - Permissividade real da amostra de 3 mm nas três concentrações estudadas.



Fonte: Produção do Autor.

6.4.3 Permeabilidade

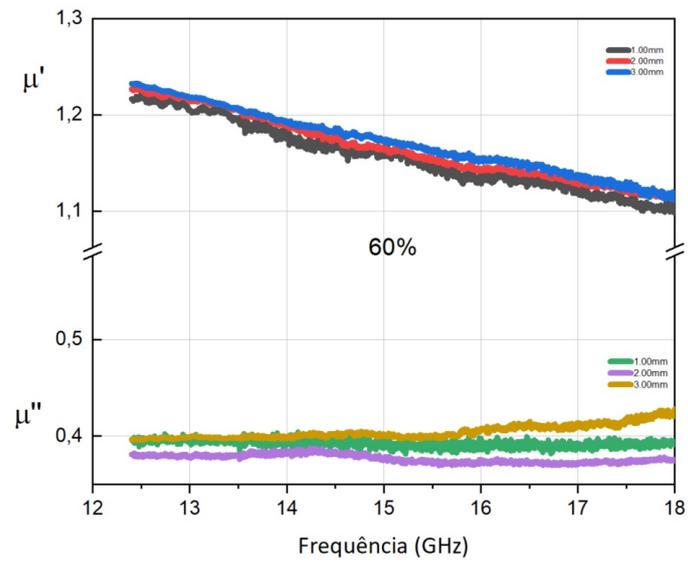
As curvas apresentadas nas Figuras 6.7, 6.8, e 6.9 apresentam a permeabilidade magnética complexa das três concentrações em três espessuras. É possível observar que, nas partes real μ' e imaginária μ'' , existe uma variação de valores entre 1,0 e 1,4 e entre 0,4 e 0,9, respectivamente.

Tabela 6.2 - Valores médios de μ' e μ'' para as três concentrações de FC

Concentração	μ'	μ''
60%	1,0	0,4
70%	1,2	0,6
80%	1,4	0,9

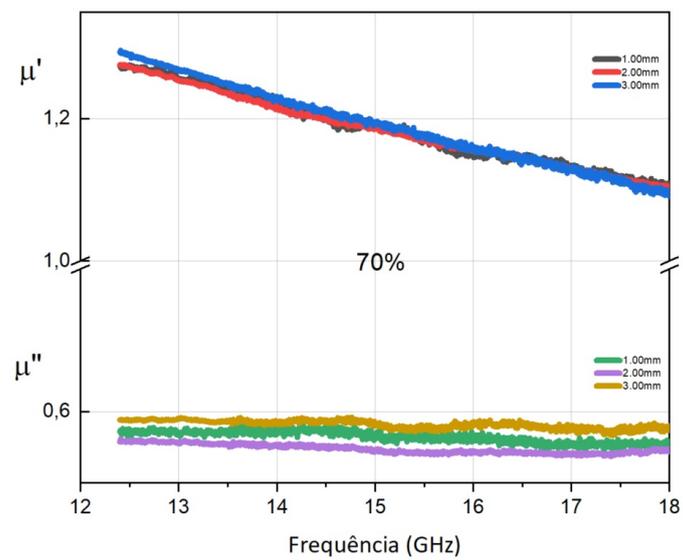
Ao analisar a Tabela 6.2 observa-se que com o aumento de concentração de ferrocarbonila, a parte imaginária tem um aumento crescente, que pode estar associado a característica magnética da ferrocarbonila, quanto maior a concentração maior a probabilidade de magnetização, o que condiz com a literatura (PORT, 2011).

Figura 6.7 - Permeabilidade dos Compósitos de 60%.



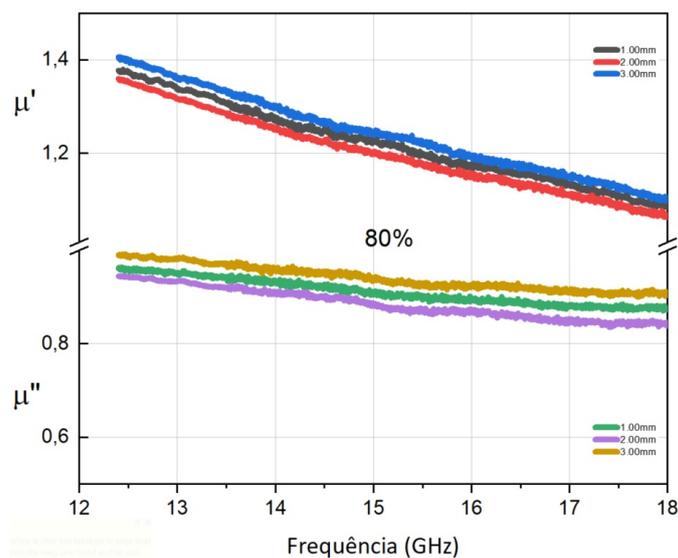
Fonte: Produção do Autor.

Figura 6.8 - Permeabilidade dos Compósitos de 70%.



Fonte: Produção do Autor.

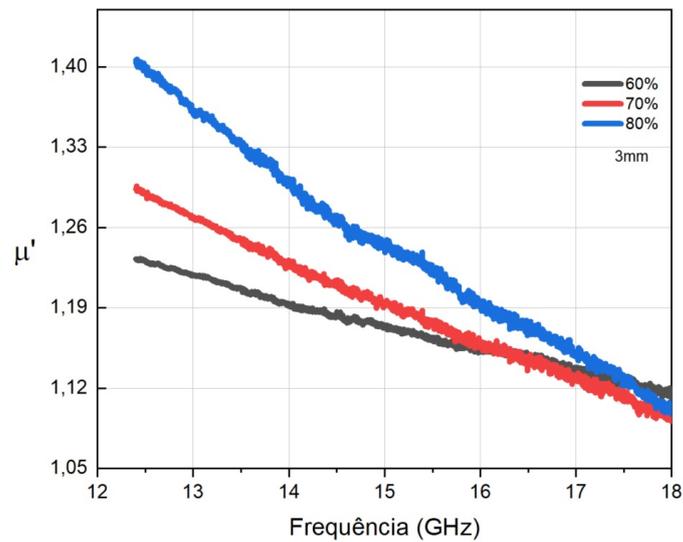
Figura 6.9 - Permeabilidade dos Compósitos de 80%.



Fonte: Produção do Autor.

Para ambas concentrações e espessuras, o aumento da concentração de ferrocarbonila demonstrou um aumento em μ' e em μ'' . Os maiores valores médios de μ' foram 1,2 e 1,4 respectivamente para as concentrações de 70% e 80%. Os valores de μ'' apresentaram um ligeiro aumento em função da concentração de ferrocarbonila, indicando que o aumento da concentração tem influência maior nos parâmetros de ϵ'_r e μ''_r para as condições estudadas nesta dissertação, em relação aos parâmetros banda de frequências, matriz polimérica, tipo de ferrocarbonila e formulação dos compósitos. Observa-se que o aumento da concentração resultou em valores de permeabilidade mais constantes em função da frequência, isto é, uma menor variação dos valores ao longo da Banda-Ku.

Figura 6.10 - Permeabilidade da amostra de 3 mm nas três concentrações.



Fonte: Produção do Autor.

Os valores obtidos de ϵ'_r , ϵ''_r , μ'_r e μ''_r dos compósitos de ferrocarbonila com resina epóxi estão próximos dos valores publicados em literatura para o mesmo tipo de ferrocarbonila com resina epóxi. Entretanto, os valores não são idênticos, pois há uma grande dependência dos valores de permissividade e permeabilidade complexas do material absorvedor com o tipo de matriz utilizada (CHEN et al., 2017).

Os resultados obtidos para amostras com altas concentrações de FC também encontram-se de acordo com os resultados de Chen et al. ((CHEN et al., 2017)). Os autores constataram que os valores e a dispersão aumentam com o aumento da proporção do pó magnético (ferrocarbonila). Chen ressalta que existe uma relação direta entre a constante magnética do compósito com o aumento do fração volumétrica de FC, ou seja, a permeabilidade do material depende da concentração de FC utilizada.

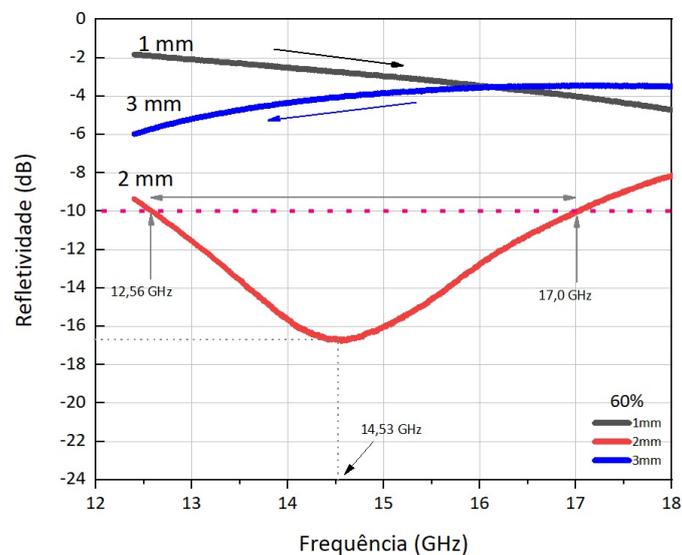
6.4.4 Refletividade com placa metálica

Para as medidas de refletividade é necessário utilizar apenas uma porta e introduzir atrás da amostra uma placa metálica. Através dessa medida é possível obter a atenuação da onda durante a interação com a amostra, a atenuação sempre será maior por não existir possibilidade de transmissão da onda, por esse motivo a medida com

a placa metálica atrás da amostra é necessária. Esse ganho na atenuação é devido a onda ser totalmente refletida para o material absorvedor, maximizando o efeito sob a onda, além de representar melhor uma possível aplicação, como por exemplo: um avião revestido pelo material produzido.

As Figuras 6.11, 6.12, e 6.13 apresentam os resultados de RL medidos dos compósitos de ferrocarbonila.

Figura 6.11 - Refletividade do compósito de 60% de FC.

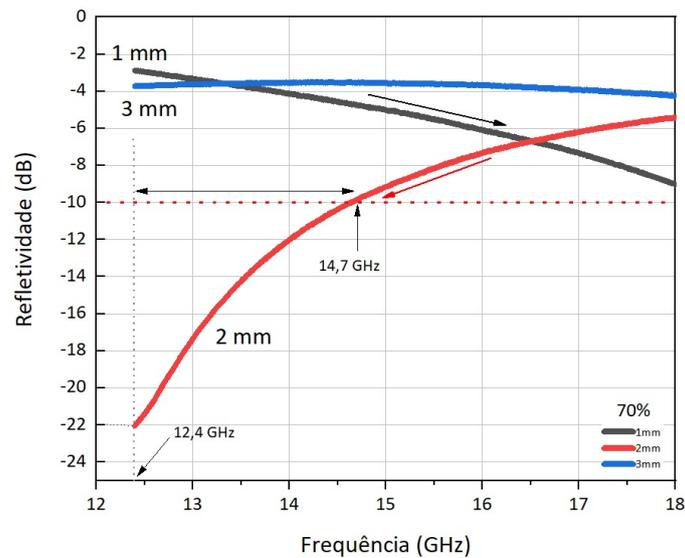


Fonte: Produção do Autor.

Na Figura 6.11, é possível observar que o melhor resultado é obtido para a espessura de 2 mm. A refletividade máxima é obtida em -16,5 dB. Este resultado, de acordo com a Tabela 2.4, apresenta uma atenuação entre 96,9 e 99,0%. É importante salientar que esta amostra apresenta uma banda de atenuação que varia de 12,56 GHz a 17 GHz em -10dB, ou seja, absorve em boa parte da faixa de frequência da Banda-Ku. A atenuação é associada ao casamento de impedância que tem seu máximo em 14,53 GHz. O compósito de 1 mm apresenta um comportamento linear decrescente para altas frequências e o compósito de 3 mm apresenta um comportamento linear decrescente para baixas frequências, evidenciando uma possível atenuação na Banda-X. As setas na Figura 6.11 indicam o comportamento decrescente dos compósitos, vistos

nas curvas azul e preta. Estes resultados revelam que os picos são deslocados para outras frequências, onde o pico de atenuação para as espessuras com 1 mm extrapola a Banda-K, e para espessuras com 3 mm, os picos extrapolam para a frequência da Banda-X.

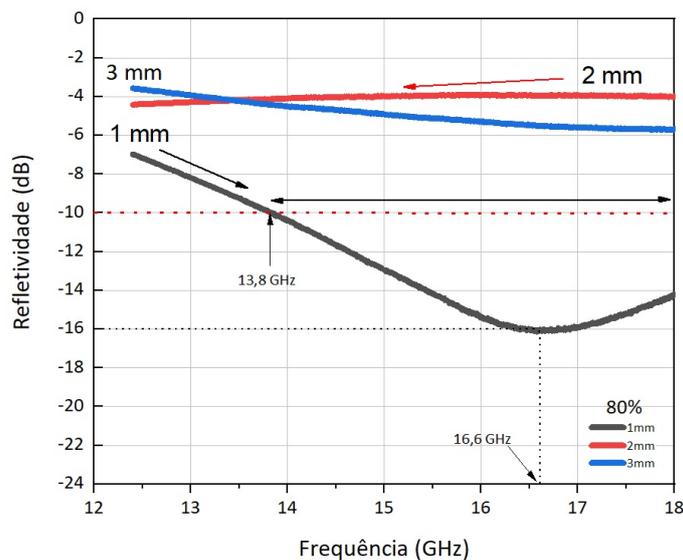
Figura 6.12 - Refletividade do compósito de 70% de FC.



Fonte: Produção do Autor.

Na Figura 6.12, o compósito de 2 mm (curva vermelha), apresenta um comportamento com intensidade máxima em -22 dB (12,4 GHz), com provável aumento desta intensidade em frequências abaixo de 12 GHz no intervalo de 14,7 GHz a 18 GHz a curva atenuação de fica acima de -10 dB. Os resultados indicam que para a espessura de 2 mm o máximo de atenuação pode ocorrer em frequências abaixo de 12 GHz, indicando a seta vermelha um comportamento decrescente. Os compósitos de 1 mm (curva preta) e 3 mm (curva azul), apresentam um provável máximo da ressonância em frequências superiores a 18 GHz.

Figura 6.13 - Refletividade do compósito de 80% de FC.



Fonte: Produção do Autor.

A Figura 6.13 exibe a refletividade para a amostra de 80% de FC. A espessura de 1 mm, apresenta uma atenuação de cerca de -16 dB (99% de absorção). Além disso, o compósito com espessura de 1 mm apresenta um comportamento de banda larga no intervalo de 13,8 GHz a 18 GHz com uma atenuação abaixo -10 dB. A amostra de 2 mm apresenta um comportamento linear decrescente para baixas frequências e a amostra de 3 mm apresenta um comportamento linear decrescente para altas frequências. A eficiência da banda larga é alcançada dentro da Banda-Ku pelo compósito de 1 mm, resultando em melhoria do potencial de absorção da onda eletromagnética, sendo crucial em determinadas aplicações como absorvedores de multicamadas e absorvedores do tipo piramidal.

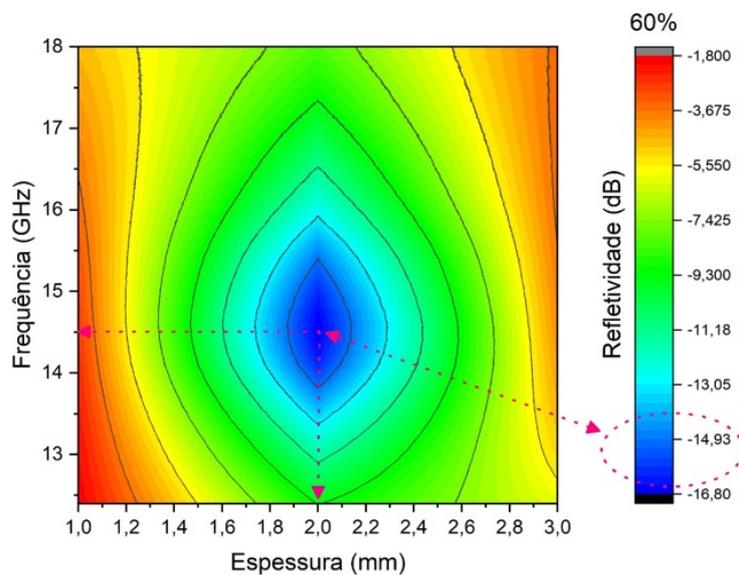
Podemos observar, analisando os três gráficos que as amostras de 3 mm apresentaram um baixo desempenho ficando acima de -6 dB para todas as concentrações estudadas. É possível observar nas Figuras 6.11, 6.12, e 6.13 que a amostra de 1 mm apresenta um comportamento linear decrescente, conforme indicado pela seta, tanto em função do aumento da frequência quanto em função do aumento da concentração. Com o aumento da concentração de 60% para 80%, a amostra apresentou um máximo de atenuação para a concentração de 80%. A amostra de 2 mm apresenta um comportamento linear decrescente para baixas frequências para a concentração de

80%. Com a diminuição da concentração para 70% observa-se uma queda acentuada da refletividade sendo o seu máximo em - 22 dB em 12,4 GHz. Para a concentração de 60% a atenuação ocorre integralmente dentro da Banda-Ku. Se analisarmos o comportamento da amostra de 1 mm em função aumento da concentração, é possível observar que a atenuação ocorre somente em 80%. Para a amostra de 2 mm, é possível verificar a atenuação em 60% e 70%. A amostra de 3 mm não apresentou atenuação em nenhuma das concentrações estudadas. Isso provavelmente está relacionado com algum processo de absorção por ressonância, devido à presença de particulados dispersos na matriz de resina epóxi (FISCHER, 2008).

6.4.5 Modelagem computacional

Um estudo complementar pode ser realizado para diferentes espessuras tendo como dados de entrada a permissividade e permeabilidade magnética para a concentração de 70% de FC. Através dos resultados obtidos nas três concentrações, foi possível realizar um estudo através de um mapa de tendência de reflexão calculado em função da espessura para as três concentrações 60%, 70% e 80% conforme as Figuras 6.14, 6.15 e 6.16.

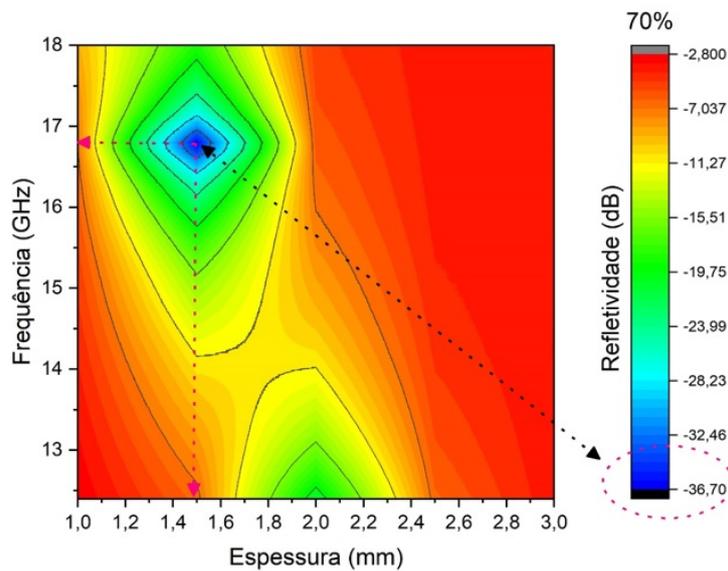
Figura 6.14 - Mapa de tendência da reflexão das amostras de 60% em função da frequência e espessura.



Fonte: Produção do Autor.

O desempenho de absorção dos compósitos de FC foram calculados através dos mapas de tendência, obtidos através do cálculo da Equação 2.91. Como pode ser observado na Figura 6.14, a área sombreada na cor azul, mostra o valor aproximado de RL entre -15 dB e -16,80 dB para a espessura de 2 mm em 14,53 GHz. Este resultado corrobora o resultado experimental para a amostra de 2 mm, confirmando os dados experimentais de acordo com a Figura 6.11.

Figura 6.15 - Mapa de tendência da reflexão das amostras de 70% em função da frequência e espessura.

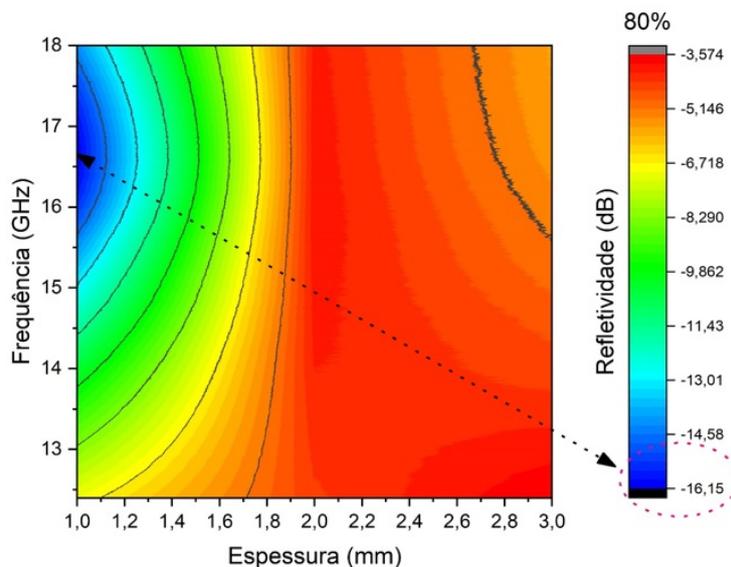


Fonte: Produção do Autor.

Os cálculos demonstram que 90% das ondas incidentes são absorvidas quando o valor de RL alcançasse -10 dB. Na Figura 6.15, é possível observar dois pontos de absorção um próximo de 12 GHz, limite da Banda-Ku, com 2 mm de espessura e outro em aproximadamente 17 GHz para uma espessura de 1,5 mm, com uma absorção próxima de -36 dB. Se compararmos as curvas de nível apresentadas na Figura 6.14 e 6.15 é possível observar que para a amostra de 1,5 mm, as curvas estão mais próximas revelando um absorvedor de banda mais estreita. No entanto, as curvas de nível para a Figura 6.14 são mais espaçadas o que indica um absorvedor de banda larga, corroborando com os dados experimentais da Figura 6.11.

Na Figura 6.16, é revelado que para a concentração de 80% a amostra com espessura de 1 mm apresenta uma atenuação na frequência de ≈ 16 GHz com pico de absorção em aproximadamente -16,15 dB, indicando um pouco mais de 99% de absorção. Estes resultados corroboram com os resultados experimentais para a amostra de 1 mm (Figura 6.13). Os dados obtidos através do estudo dos mapas de tendência mostram que a diferença de espessura é capaz de mudar expressivamente a resposta eletromagnética. Para as concentrações de 60% e 80%, apenas uma espessura foi identificada como um possível absorvedor abaixo de -10 dB. No entanto para a amostra com 70% duas possíveis espessuras, 1,5 mm e 2 mm, apresentaram potencial para absorverem abaixo de -10 dB.

Figura 6.16 - Mapa de tendência da reflexão das amostras de 80% em função da frequência e espessura.

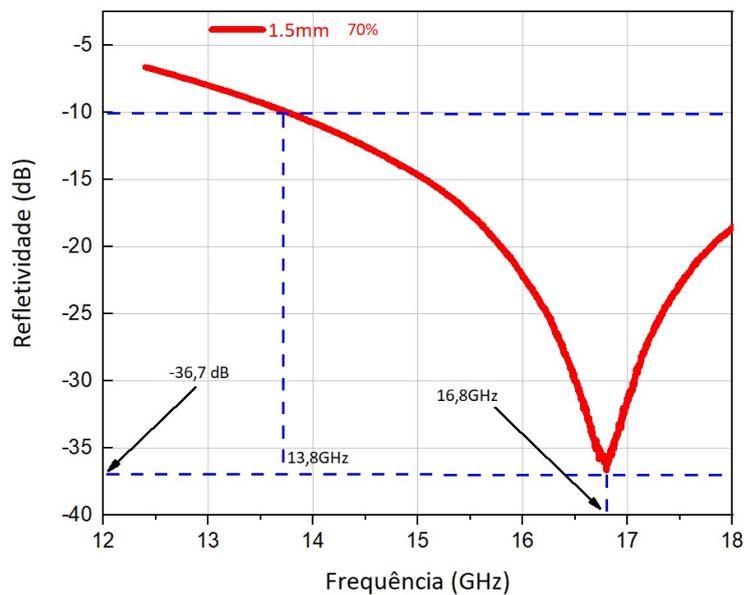


Fonte: Produção do Autor.

Nesta dissertação um dos objetivos do trabalho foi a investigação da refletividade através de diferentes espessuras. Foram caracterizados compósitos com as espessuras de 1 mm, 2 mm e 3 mm. Utilizando recursos computacionais foi possível identificar através do mapeamento das espessuras em função da frequência que a espessura de 1,5 mm apresenta um alto desempenho como absorvedor chegando a uma atenuação aproximada de - 37 dB. Com o objetivo de validar os cálculos, uma amostra de 1,5

mm foi confeccionada Os resultados para a refletividade são apresentados na Figura 6.17. É possível observar que os dados obtidos através do mapeamento de espessuras, corroboram com os dados experimentais. A amostra de 1,5 mm confeccionada, apresentou uma absorção máxima em ≈ -37 dB em 16,8 GHz, ou seja, uma excelente atenuação (99,9% da radiação incidente). Este compósito é um absorvedor de banda larga (13,8 a 18 GHz).

Figura 6.17 - Refletividade do Compósito 70% com 1,5 mm de espessura.



Fonte: Produção do Autor.

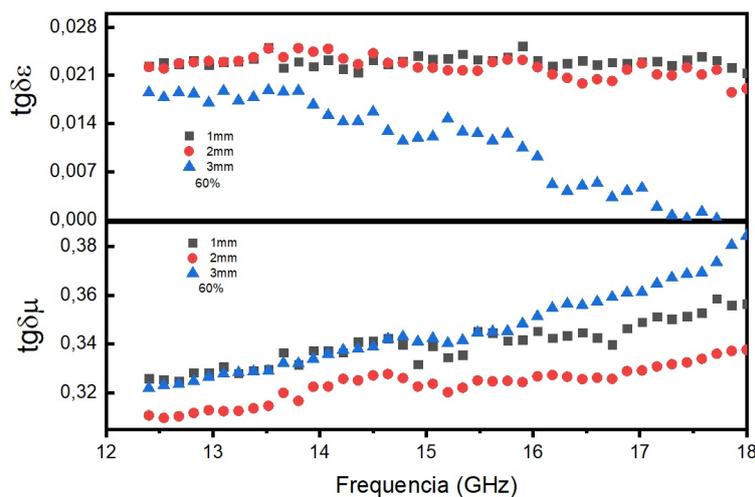
Um absorvedor de onda eficaz tem propriedades não apenas uma alta intensidade de absorção, mas também uma ampla banda de absorção, combinada com uma pequena espessura. Para que não ocorra a reflexão da onda eletromagnética incidente, deve haver o casamento de impedância do absorvedor Z_{in} e a impedância com a do espaço livre Z_0 . Neste caso, a onda eletromagnética incidente entra no absorvedor para ser atenuada e não refletida. Um excelente absorvedor converte a onda incidente em outras formas de energia. As propriedades absorptivas do material podem ser estimadas a partir das propriedades elétricas e magnéticas. A permissividade elétrica ϵ é composta por uma parte real (ϵ') e uma parte imaginária ϵ'' ($\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$).

A parte real (ϵ') está associada com a habilidade do material armazenar energia, ou ao grau de polarização do material. A parte imaginária (ϵ''), por sua vez, indica a perda de energia. É importante notar que ϵ'' é praticamente zero para todas as concentrações estudadas, indicando que a dissipação é praticamente nula.

6.4.6 Mecanismos de atenuação

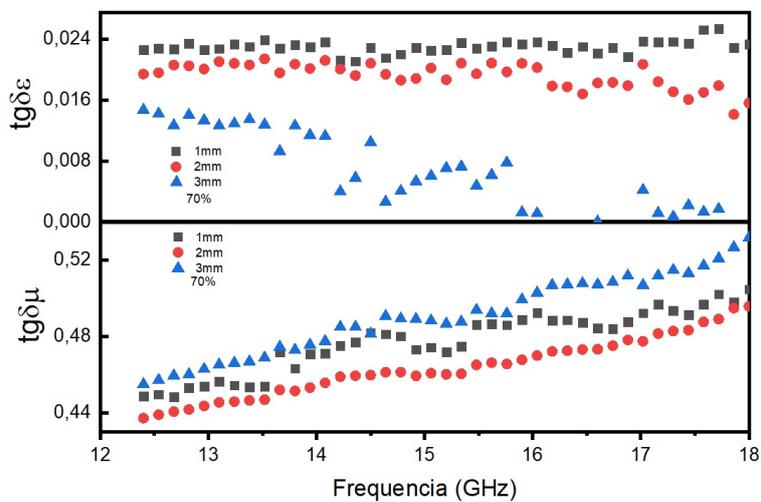
A tangente de perda é utilizada para caracterizar as perdas da onda incidente no absorvedor. As tangentes de perdas podem ser dielétricas ou magnéticas. A tangente de perda dielétrica ($\tan \delta\epsilon$) é calculada a partir dos dados da permissividade elétrica e a tangente de perda magnética ($\tan \delta\mu$) a partir dos dados da permeabilidade magnética. Podemos observar um comportamento muito semelhante para todas as concentrações de 60% e 70%. A tangente de perda magnética $\tan \delta\mu$ tem um comportamento crescente com a frequência, ao passo que, para a tangente de perda elétrica $\tan \delta\epsilon$ é praticamente constante para as amostras de 1 e 2 mm, e apresenta um decaimento acentuado, com o aumento da frequência, para a amostra de 3 mm. Para a concentração de 80% a $\tan \delta\epsilon$ é praticamente constante para todas as amostras. Podemos ainda constatar que a $\tan \delta\epsilon$ oscila em torno de $\tan \delta\epsilon \approx 0.024$ para todas as concentrações. No entanto a $\tan \delta\mu$ aumenta com o aumento da concentração (LIU et al., 2015). As Figuras 6.18, 6.19, e 6.20 apresentam as curvas de tangente de perda elétrica e magnética para as três concentrações.

Figura 6.18 - Tangentes de Perda Elétrica e Magnética dos compósitos de 60%.



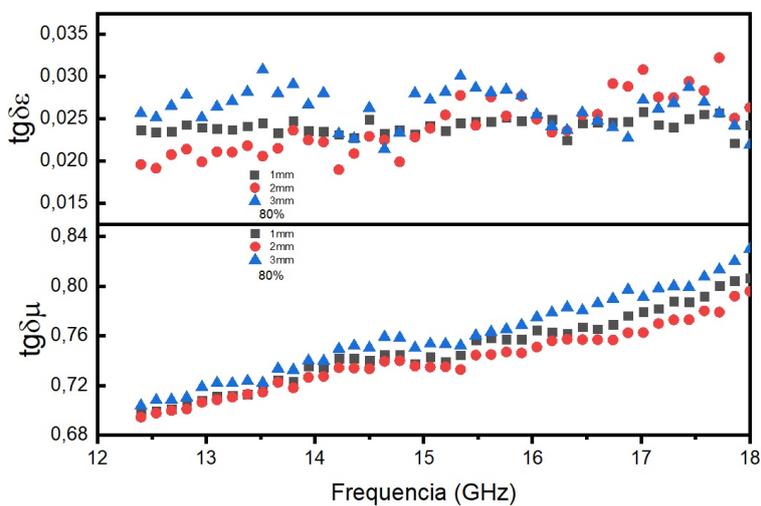
Fonte: Produção do Autor.

Figura 6.19 - Tangentes de Perda Elétrica e Magnética dos compósitos de 70%.



Fonte: Produção do Autor.

Figura 6.20 - Tangentes de Perda Elétrica e Magnética dos compósitos de 80%.



Fonte: Produção do Autor.

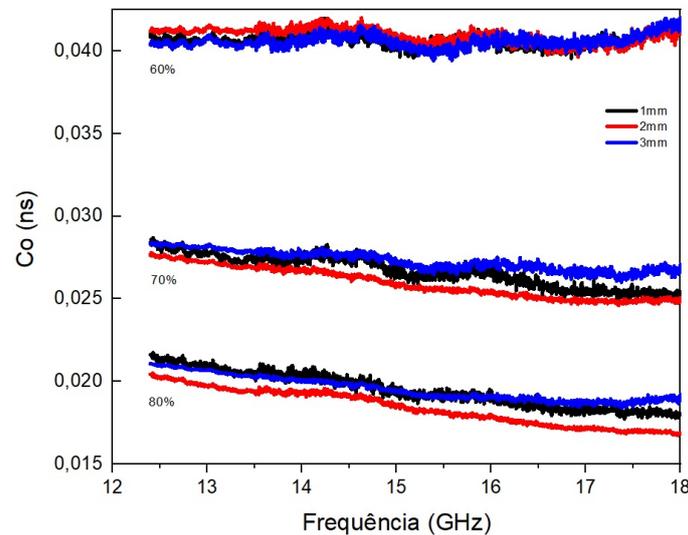
Estes resultados sugerem que as perdas tem um papel relevante no mecanismo de

atenuação. As perdas magnéticas estão associadas a corrente parasita (*Eddy Current*)¹, ressonância natural, perda por histerese e ressonância de parede de domínio. A ressonância natural ocorre a uma frequência muito inferior a frequência analisada neste experimento. A histerese magnética é desprezível na presença de campos pouco intensos e a ressonância de parede de domínio ocorre na faixa de MHz. Por outro lado, a contribuição da corrente parasita pode ser expressa através da Equação 6.1.

$$Co = \mu''(\mu')^{-2}f^{-1} = 2\pi\mu_0\sigma d^2 \quad (6.1)$$

De acordo com a Equação 6.1, se a perda magnética tiver origem no efeito da corrente parasita, Co será uma constante com o aumento da frequência da onda eletromagnética. A Figura 6.21 representa a contribuição de corrente parasita para os três compósitos. É possível constatar que o Co é praticamente constante para todas as concentrações estudadas. Há um aumento das perdas pelas correntes parasitas em função da concentração. Os dados não revelam uma dependência acentuada com a variação da espessura, permanecendo constante para quase todas as concentrações.

Figura 6.21 - Contribuição de Corrente Parasita para os três compósitos.

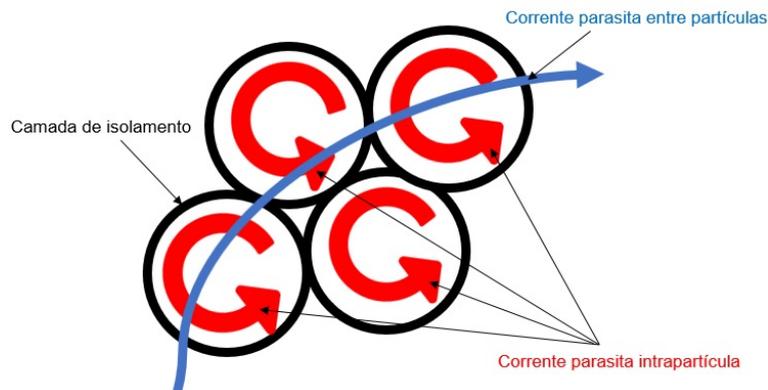


Fonte: Produção do Autor.

¹Corrente de Foucault (Eddy Current) é a corrente elétrica induzida dentro de um material condutor, quando sujeito a um campo magnético variável devido à lei de indução de Faraday.

A corrente parasita origina-se através da passagem do fluxo magnético. A Figura 6.22, destaca a presença de duas correntes, uma global que envolve o comportamento coletivo da ferrocarbonila e a corrente individual associada a cada aglomerado. Com o aumento da concentração aumenta-se o número de aglomerados e como consequência há um aumento na tangente magnética ($\tan \delta\mu$). Estes resultados podem ser constatados nas Figuras 6.18, 6.19, e 6.20. É importante mencionar que o tamanho dos aglomerados e também o tamanho das partículas que compõem um determinado aglomerado podem influenciar na corrente parasita.

Figura 6.22 - Correntes parasitas geradas no núcleo de energia.



Fonte: Produção do Autor.

Um outro possível mecanismo de a ser considerado refere-se a teoria do cancelamento de $\frac{1}{4}$ do comprimento de onda. De acordo com a teoria do cancelamento do $\frac{1}{4}$ do comprimento de onda, a reflexão é mínima e pode ser obtida quando a espessura do absorvedor satisfaz a Equação 6.2 para uma onda eletromagnética a uma determinada frequência, relacionada ao mínimo da refletividade (FANG et al., 2017).

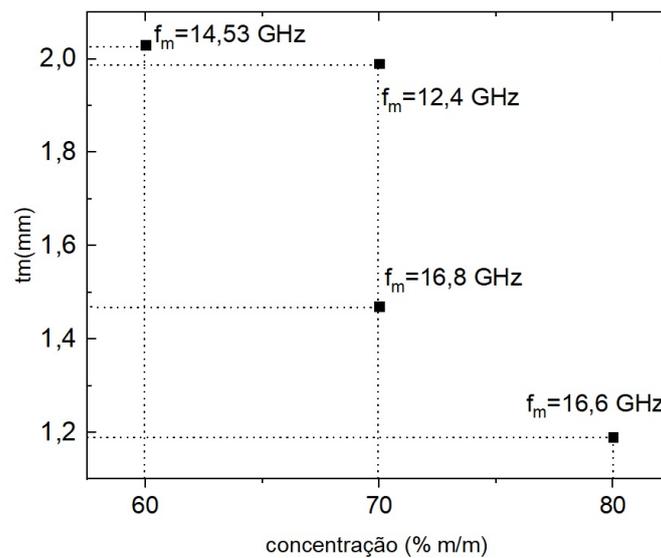
$$tm = nc / (4f_m \sqrt{|\varepsilon_r| |\mu_r|}) (n = 1, 3, 5 \dots) \quad (6.2)$$

Sendo que, a uma espessura apropriada, a onda eletromagnética oriunda do absorvedor e absorvedor-metal (placa metálica) estão fora de fase por 180° , ocasionando a extinção da onda. Sendo tm a espessura do absorvedor e f_m a frequência obtida

no máximo de atenuação. De acordo com a equação 6.2, para a amostra de 1,5 mm, o valor obtido para satisfazer a teoria do cancelamento seria de 1,477 mm, ou seja, um valor muito próximo do valor obtido experimentalmente. Este alto valor de atenuação obtido para a amostra de 1,5 mm pode estar associado ao cancelamento das ondas. A Figura 6.23 representa o cálculo do cancelamento de $\frac{1}{4}$ do comprimento de onda.

Os cálculos para as outras concentrações e espessuras foram realizados, e os valores estão em concordância com os resultados experimentais. O resultado que mais se afasta da teoria é para a amostra de 1 mm. O resultado obtido foi de $tm=1,19$ mm. Estes resultados demonstram que o cancelamento da onda pode ser um dos mecanismos envolvidos no processo de atenuação da onda.

Figura 6.23 - Cálculo do cancelamento de $\frac{1}{4}$ do comprimento de onda .



Fonte: Produção do Autor.

Um outro mecanismo importante para materiais dielétricos é o mecanismo de relaxação por Debye. De acordo com a teoria, a permissividade complexa pode ser escrita pelas Equações 6.3 e 6.4.

$$\varepsilon' = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}}{1 + (2\pi f)^2 \tau^2} \quad (6.3)$$

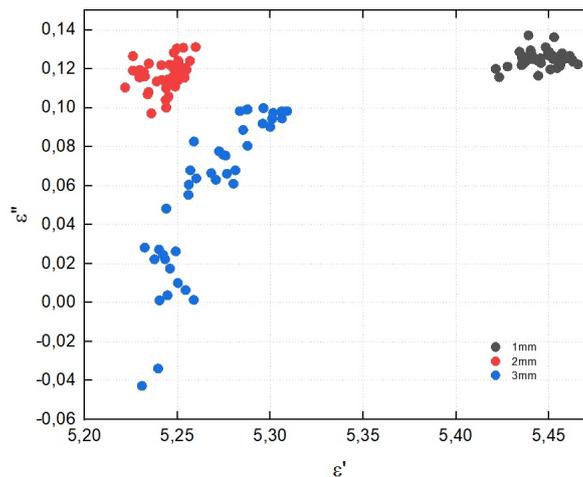
$$\varepsilon'' = \frac{2\pi f \tau (\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty})}{1 + (2\pi f)^2 \tau^2} \quad (6.4)$$

De acordo com as Equações 6.3 e 6.4 é possível estabelecer uma relação entre ε' e ε'' que é mostrada na Equação 6.5.

$$\left(\varepsilon' - \frac{\varepsilon_s + \varepsilon_{\infty}}{2}\right)^2 + (\varepsilon'')^2 = \left(\frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}}{2}\right)^2 \quad (6.5)$$

Conforme a teoria, o gráfico de ε' e ε'' apresenta semicírculos, usualmente indicados como semicírculo Cole-Cole. Cada semicírculo corresponde a uma relaxação de Debye, estes semicírculos deveriam estar presente no eixo x . Os resultados apresentado na Figura 6.24 não revelaram a presença de semicírculos, ou seja, é possível descartar o mecanismo de relaxação por Debye. Embora ε' indique a presença de polarização, os resultados não revelam o mecanismo de relaxação de Debye como o mecanismo preponderante para justificar a atenuação. A Figura 6.24, exhibe pontos muito aglomerados para as espessuras de 1 e 2 mm.

Figura 6.24 - Gráfico ε'' e ε' .

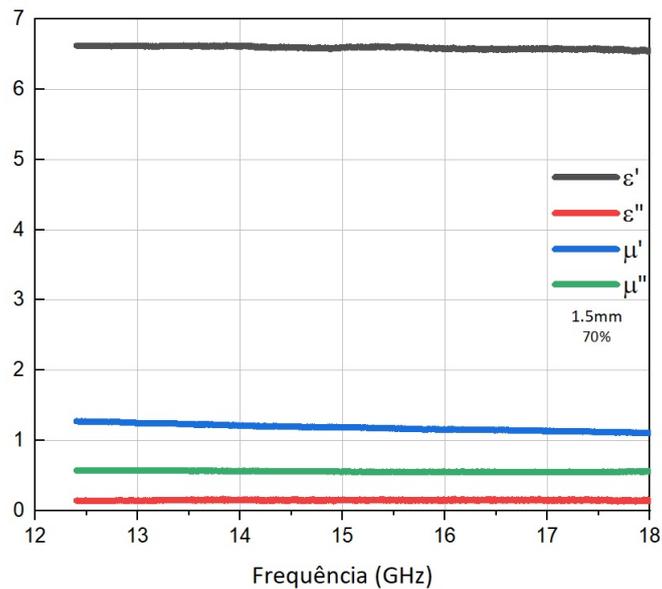


Fonte: Produção do Autor.

A amostra de 3 mm, apresenta uma maior dispersão, porém não indica uma correspondência com o mecanismos de relaxação de Debye.

Na Figura 6.25 estão apresentados as curvas de permissividade e permeabilidade do compósito de 1,5 mm de espessura com 70% de FC.

Figura 6.25 - Permissividade e Permeabilidade do compósito 70% com 1,5 mm de espessura.



Fonte: Produção do Autor.

Pode-se observar pelo gráfico da Figura 6.25 que todas as curvas dos parâmetros ϵ' , ϵ'' , μ' e μ'' são praticamente constantes em toda a faixa de frequência. Os resultados indicam que a permissividade real relativa do compósito foi em média, de aproximadamente de 6,5. O mesmo resultado foi obtido para as amostra de 1 mm, 2 mm e 3 mm.

7 CONCLUSÕES

O material utilizado neste trabalho para a produção dos compósitos foi a FC, produzida a partir da composição de ferro, carbono e nitrogênio, sendo o ferro o principal elemento de sua composição. A FC apresentou propriedades interessantes para absorção da onda eletromagnética, desta forma, os estudos contribuíram para pesquisas em absorção da radiação eletromagnética na faixa de frequência de 12,4 a 18 GHz.

A FC apresentou ótimos resultados de absorção, de cerca de 99,9% da radiação incidente, em uma faixa mais larga, ou seja banda larga, aproximadamente 12,5 GHz a 17 GHz.

De acordo com os resultados é possível observar que a variação do tamanho da espessura, bem como a concentração de FC na resina epóxi, contribuíram no comportamento da permissividade e refletividade do compósito. Os compósitos de FC apresentaram valores de permissividade relativa entre 5,5 e 10,02. A permissividade imaginária relativa exibiu valores sem variação, em torno de 0,1.

Além disso, não foi observada uma variação na permissividade e permeabilidade em função da espessura da amostra de 1 mm, 2 mm e 3 mm. Este fato contribuiu fortemente para simular a refletividade em função da espessura utilizando o modelo NRW e o modelo de linha de transmissão, devido a ter apenas, um parâmetro a ser alterado, a espessura das amostras, e essa variação não influencia na permissividade e permeabilidade. A teoria da linha de transmissão mostrou-se um bom método para estimar a refletividade para diferentes espessuras.

Considerando a teoria do cancelamento de $1/4$ do comprimento de onda, a ferrocarbonila apresentou um excelente desempenho de atenuação. Para a amostra de 1,5 mm o valor obtido de 1,477 mm satisfaz a teoria, ficando muito próximo do valor experimental, que é a amostra com espessura de 1,5 mm.

Este estudo mostrou que mudando arranjos, espessura e concentração dos compósitos, é possível aumentar o potencial de absorção da onda eletromagnética. Isso torna os compósitos de matriz polimérica um dos mais promissores materiais estruturais de absorção de ondas eletromagnéticas.

8 TRABALHOS FUTUROS

Outros estudos poderão trazer contribuições para avanços tecnológicos no setor aeroespacial, por exemplo: estudar a variação da impedância em função do comprimento da amostra através de acoplamento de mono camadas para a produção de amostras multicamadas;

Em uma perspectiva futura, a continuidade do estudo de MARE à base de ferro-carbonila em matriz epóxi, poderá trazer contribuições para avanços tecnológicos no setor aeroespacial, tais como: investigar a relação da morfologia dos particulados com o processo de atenuação, estudar a variação da impedância em função do comprimento da amostra através de acoplamento de mono camadas para a produção de amostras multicamadas, estudar o processo de atenuação em outras faixas de frequências, produzir amostras com geometrias piramidais para avaliar a influência geométrica no processo de absorção e utilizar particulados de materiais com propriedades magnéticas;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMARAL JUNIOR, M. **Programa em linguagem de programação Python para extração da permissividade e permeabilidade através dos parametros-S utilizando o método de Nicolson-Ross-Weir**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2017. 75 p. Disponível em: <<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3P9BEA8>>>. 41

AMARAL JUNIOR, M. **Obtenção e caracterização de compósitos á base de fibras de carbono e fibras de carbono ativadas aplicados a materiais absorvedores de radiação eletromagnética na faixa de frequencia em microondas de 8.2 a 12.4 GHz**. 207 p. Tese (Doutorado em Engenharia e Tecnologia Espaciais - Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Brasil, 2018. 8, 9, 15, 20, 25, 58

BAHADOOR, A.; WANG, Y.; AFSAR, M. N. **Complex permittivity and permeability of barium and strontium ferrite powders in X, KU, and K-band frequency ranges**. [S.l.: s.n.], 2005. 10–13 p. 46

BAKER-JARVIS, J. **Transmission/reflection and short-circuit line permittivity measurements**. [S.l.]: National Institute of Standards and Technology Colorado, 1990. 33

BALANIS, C. A. **Antenna theory: analysis and desing**. [S.l.]: John Wiley Sons, 2016. 31

BOGGIONE, G. D. A.; PEREIRA, G.; CARDOZO, F. D. S.; FONSECA, L. M. G.; BOGGIONE, G. D. A.; PEREIRA, G. Avaliação de imagens simuladas da câmara MUX do satélite CBERS-4 aplicadas à análise ambiental. **Boletim de Ciencias Geodesicas**, v. 20, n. 3, p. 590–609, 2014. ISSN 19822170. 4

CALLISTER, W. D.; WILEY, J. **Materials science**. [S.l.: s.n.], 2002. 20 p. ISSN 00219584. ISBN 9780471736967. 30, 98

CHATURVEDI, P. K. **Microwave, radar & RF engineering**. [S.l.: s.n.], 2018. ISBN 9789811079641. 7, 28

CHEN, C. C.; LIANG, W. F.; NIEN, Y. H.; LIU, H. K.; YANG, R. B. Microwave absorbing properties of flake-shaped carbonyl iron/reduced graphene oxide/epoxy composites. **Materials Research Bulletin**, v. 96, n. 2016, p. 81–85, 2017. ISSN

00255408. Disponível em:

<<http://dx.doi.org/10.1016/j.materresbull.2017.01.045>>. 2, 71

COELHO FILHO, P. R. C. **Utilização de filme a base de blenda de polianilina e poli (álcool vinílico) com a finalidade de blindagem eletromagnética**. 142 p. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008. 15

COSTA F.; BORGES, M. D. M. M. A. Eletromagnetic characterisation os materials by using transmission/reflection (T/R) devices. **Electronics**, v. 6, n. 4, p. 95, 2017. 9, 11

CULLITY, B. D.; STOCK, S. R. **Elements of X-ray diffraction**. 3. ed. [S.l.: s.n.]. 57, 97

DANG, Z.; SHEN, Y.; FAN, L.; CAI, N.; NAN, C.; ZHAO, S. Dielectric properties of carbon fiber filled low-density polyethylene. **Journal of Applied Physics**, v. 93, n. 9, p. 5543, 2003. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1063/1.1562740>>. 67

DELFINI, A.; ALBANO, M.; VRICELLA, A.; SANTONI, F.; RUBINI, G.; PASTORE, R.; MARCHETTI, M. Advanced radar absorbing ceramic-based materials for multifunctional applications in space environment. **Materials**, v. 11, n. 9, p. 1730, 2018. 3

DUAN, Y.; GUAN, H. **Microwave absorbing materials**. [S.l.: s.n.], 2016. ISBN 9789814745109. 33, 35, 36

DUAN, Y.; LI, G.; LIU, L.; LIU, S. Electromagnetic properties of carbonyl iron and their microwave absorbing characterization as filler in silicone rubber. **Bulletin of Materials Science**, v. 33, n. 5, p. 633–636, 2010. ISSN 02504707. 1

ELLIS, B. **Materials science**. [S.l.: s.n.], 1993. 342 p. ISSN 00219584. ISBN 9789401053020. 5, 49, 50

EPIPHANIO, J. C. N. Satelites brasileiros de observação da terra: balanço e perspectivas. In: . [S.l.]: Anais XVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO - SBSR - São José dos Campos: INPE, 2014. v. 16, p. 2218–2225. 4

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (EEA). Summary for policymakers. In: INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (Ed.). **Climate**

change 2013 - the physical science basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2019. v. 53, n. 9, p. 1–30. ISBN 9788578110796. Disponível em:

<<https://www.cambridge.org/core/product/identifier/CB09781107415324A009/type/book{ }part>>. 17

FANG, J.; SHANG, Y.; CHEN, Z.; WEI, W.; HU, Y.; YUE, X.; JIANG, Z. Rice husk-based hierarchically porous carbon and magnetic particles composites for highly efficient electromagnetic wave attenuation. **Journal of Materials Chemistry C**, v. 5, n. 19, p. 4695–4705, 2017. 82

FENG, Y. B.; QIU, T.; SHEN, C. Y. Absorbing properties and structural design of microwave absorbers based on carbonyl iron and barium ferrite. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 318, n. 1-2, p. 8–13, 2007. 46, 64

FISCHER, N. L. **Novel composites for microwave absorption.** 1–82 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) — Iowa State University, Ames, USA, 2008. 27, 75

FOLGUERAS, L. d. C.; ALVES, M. A.; REZENDE, M. C. Microwave absorbing paints and sheets based on carbonyl iron and polyaniline: measurement and simulation of their properties. **Journal of Aerospace Technology and Management**, v. 2, n. 1, p. 63–70, 2010. 46

FRIEDERANG, A. W.; SCHLEGEL, R. BASF continues to evolve carbonyl iron powders. **Metal Powder Report**, v. 54, n. 3, p. 18–20, mar 1999. ISSN 00260657. Disponível em:
<<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0026065799803397>>. 46, 47, 48, 49

GHIONE, G.; PIROLA, M. **Microwave electronics.** [S.l.: s.n.], 2017. 1–573 p. ISBN 9781316756171. 16, 17, 32

GOGOI, J. P.; BHATTACHARYYA, N. S.; RAJU, K. C. J. Synthesis and microwave characterization of expanded graphite/novolac phenolic resin composite for microwave absorber applications. **Composites Part B: Engineering**, v. 42, n. 5, p. 1291–1297, 2011. ISSN 13598368. Disponível em:
<<http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.01.026>>. 1

GURGEL, D. **Estudo e desenvolvimento de material absorvedor de microondas baseado em Nb2O5 com M0 via metalurgia do pó.** 113 p. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Comunicação e Automação) — Universidade Federal Rural do Semi-Arido, Mossoró, 2016. 19, 20

HIEBEL, M. **Fundamentals of vector network analysis**. [S.l.]: Rohde & Schwarz, 2007. 28, 29

HONGFEI, L.; JIANJIANG, W.; BAOCAL, X.; GUOSHUN, W.; YONGSHEN, H.; HAITAO, G.; WEIMIN, Y. Effects of mg or sr doping on the intrinsic characteristics and absorption properties of micro-nano bafe12o19 hollow multiphase ceramic microsphere. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 374, p. 530–538, 2015. 67

IBBOTSON, L. **The fundamentals of signal transmission in line, waveguide, fibre and free space**. [S.l.]: Wendy Rooke, 2004. 20

JORDAN. Summary for policymakers. In: INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (Ed.). **Climate change 2013 - the physical science basis**. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. v. 53, n. 9, p. 1–30. ISBN 9781119564140. Disponível em: <<https://www.cambridge.org/core/product/identifier/CB09781107415324A009/type/book{ }part>>. 2, 8, 40

KAPUR, V. **Stealth technology and its effect on aerial warfare**. [S.l.: s.n.], 2014. ISBN 9789382169345. 3

KEYSIGHT. **Reflection measurements**. 2020. Disponível em: <http://na.support.keysight.com/pxi/help/latest/Tutorials/Reflection_Measurements.htm>. Acesso em: 10 fev. 2020. 37

KULESHOV, G. E.; SBRODOV, A. V.; SHEMATILO, T. N. Electromagnetic response from multilayer composite coatings based on carbonyl iron, ferroelectrics and MWCNTs at microwave. **ITM Web of Conferences**, v. 30, p. 07011, 2019. 67

LIU, C.; YUAN, Y.; JIANG, J. T.; GONG, Y. X.; ZHEN, L. Microwave absorption properties of FeSi flaky particles prepared via a ball-milling process. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 395, p. 152–158, 2015. 79

MINOLI, D. **Innovations in satellite communication and satellite technology**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2015. 5

NOHARA, E. L. **Materiais absorvedores de radiação eletromagnética (8-12 GHz) obtidos pela combinação de compósitos avançados dielétricos e revestimentos magnéticos**. 198 p. (Doutorado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica - Física e Química dos Materiais Aeroespaciais), Instituto Tecnológico da Aeronáutica, São José dos Campos, 2003. 3, 11, 16, 31, 37

PAULA, A. L. de. **Método para determinação da permissividade elétrica e permeabilidade magnética de materiais isotrópicos com suporte computacional**. 183 p. Dissertação (Mestrado em Computação Aplicada) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, Brasil, 2010. 41

PEREIRA, J. J. **Caracterização eletromagnética de materiais absorvedores de microondas via medidas de permissividade e permeabilidade compelas na banda-X**. 201 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica - Tecnologia de Materiais e Processos de Fabricação) — Universidade de Taubaté, Taubaté, 2007. 8, 50

PORPINO, K. K. P.; BARRETO M. C. S., M.; CAMBUIM, K. B.; CARVALHO FILHO, J. R.; TOSCANO, I. A. S.; LIMA M. A., M. Fe (ii) adsorption on *Ucides Cordatus* crab shells. **Quimica Nova**, v. 34, n. 6, p. 928–932, 2011. ISSN 01004042. 58

PORT, R. J. **Proposição de projeto de materiais absorvedores de radiação eletromagnética multicamadas por meio de otimização evolutiva**. 225 p. (Tese (Doutorado em Engenharia Eletrônica e Computação), Instituto Tecnológico da Aeronáutica, São José dos Campos, 2011. 68

POZAR, D. **Microwave engineering**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1998. 22, 24

REZENDE, M. C.; LU, E.; MARTIN, M.; ALEXANDRE, M.; MIACCI, S.; NOHARA, E. L.; MARTIN, I. M.; MIACCI, M. A. S. Refletividade de materiais absorvedores de radiação eletromagnética usando as técnicas RCS e NRL. **Revista de Física Aplicada e Instrumentação**, v. 16, n. 1, p. 30–36, 2003. 2, 16, 20, 31, 38

SADIKU, M. **Elementos de eletromagnetismo**. [S.l.]: Porto Alegre: Bookman, 2004. 15, 16

SHAVIT, R. **Radome electromagnetic theory and design**. [S.l.: s.n.], 2018. 283 p. ISBN 9781119410829. 3

SILVEIRA, D. C.; GOMES, N.; REZENDE, M. C.; BOTELHO, E. C. Electromagnetic properties of multifunctional composites based on glass fiber prepreg and Ni/Carbon fiber veil. **Journal of Aerospace Technology and Management**, v. 9, n. 2, p. 231–240, apr 2017. ISSN 2175-9146. Disponível em: <<http://www.jatm.com.br/ojs/index.php/jatm/article/view/657>>. 1

ULABY, F. T. **Electromagnetics for engineers**. [S.l.]: Pearson, 2004. 11, 26, 31, 32

WANG, B.; WEI, J.; YANG, Y.; WANG, T.; LI, F. Investigation on peak frequency of the microwave absorption for carbonyl iron/epoxy resin composite. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 323, n. 8, p. 1101–1103, 2011. ISSN 03048853. Disponível em:
<<http://dx.doi.org/10.1016/j.jmmm.2010.12.028>>. 1, 38

APÊNDICE A - TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO

A.1 Análise estrutural

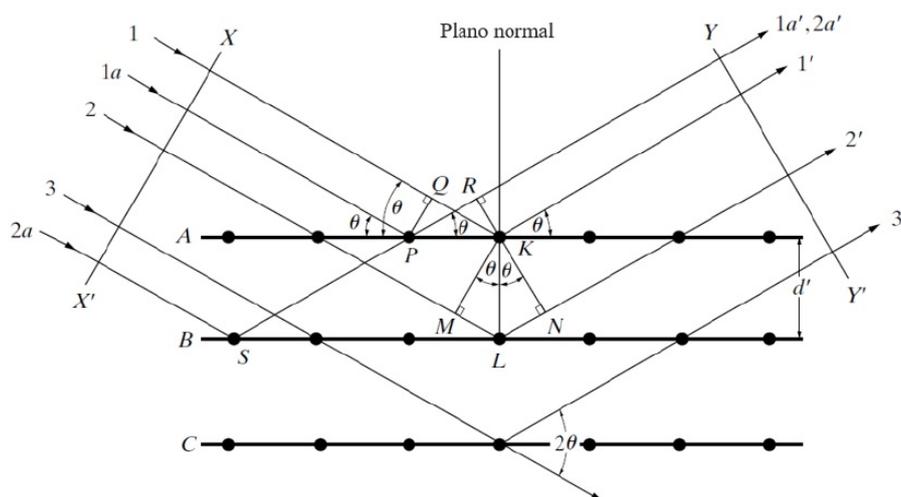
A.1.1 Difração de Raios-X

A difração de raios X é um método de determinação de informações estruturais periódicas, cristalinas dos materiais. Por causa da estrutura dos sólidos cristalinos, a difração é possível em ângulos discretos de ondas eletromagnéticas incidentes devido à interferência construtiva. O ângulo da onda incidente e o espaçamento dos planos cristalográficos estão relacionados pela equação de Bragg:

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (\text{A.1})$$

A técnica consiste na incidência da radiação em uma amostra e na detecção dos fótons difratados, que constituem o feixe difratado. Em um material onde os átomos estejam arranjados periodicamente no espaço, características das estruturas cristalinas, o fenômeno da difração de raios-X ocorre nas direções de espalhamento que satisfazem a Lei de Bragg (CULLITY; STOCK,).

Figura A.1 - Difração de Raios-x por um material cristalino.



Fonte: Cullity e Stock (2011).

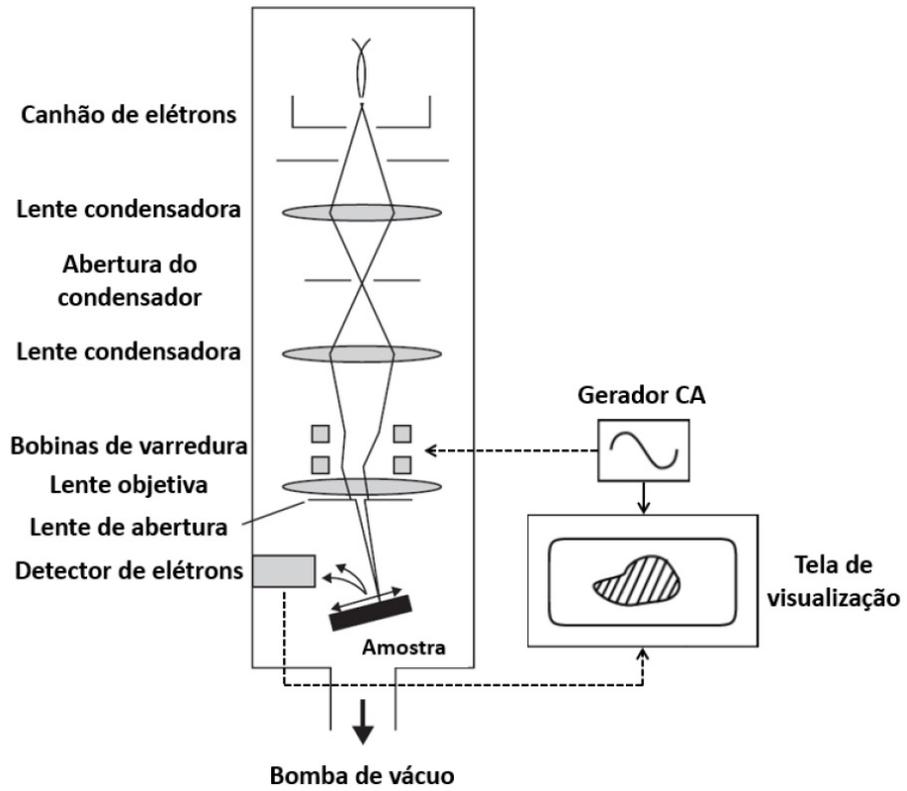
Os instrumentos de medida são o difratômetro, onde a captação do eixo difratado é feita por meio de um detector, segundo arranjo geométrico conhecido como a geometria Bragg-Brentano, que habilita a obtenção do ângulo 2θ . O feixe difratado é normalmente expresso através de picos que se destacam do background (*ou linha de base*). As intensidades obtidas, representadas através dos picos nos difratogramas correspondem à difração do feixe incidente por um determinado conjunto de planos do cristal, que possuem mesma distância interplanar (*reflexões hkl*) índices de Miller. A intensidade integrada é proporcional à intensidade de Bragg, I_{hkl} (CALLISTER; WILEY, 2002).

A.2 Análise morfológica

A.2.1 Microscopia Eletrônica de Varredura

Com o intuito de visualizar a microestrutura do material, a porosidade, observar a superfície, morfologia (forma e tamanho e características topográficas), é utilizado um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). A superfície de uma amostra a ser examinada é rastreada com um feixe de elétrons, e o feixe de elétrons refletido (ou retroespalhado) é coletado e então mostrado à mesma taxa de varredura sobre um tubo de raios catódicos (semelhante à tela de uma TV). A imagem na tela, que pode ser fotografada, representa as características da superfície da amostra. Esta caracterização também é utilizada para determinar a modalidade de uma fratura mecânica, para prever as propriedades mecânicas de ligas, para verificar se uma liga foi submetida a um tratamento térmico da maneira adequada, e também para projetar ligas com novas combinações de propriedades (CALLISTER; WILEY, 2002).

Figura A.2 - Representação do MEV.



Fonte: Tanaka (2014).

ANEXO A - PROGRAMA EM LINGUAGEM PYTHON

B.1 Script

Figura B.1 - Programa Python.

Descrição do programa:

1-) Coloque os dados e_u.csv na pasta 'dados'

2-) O programa irá pegar de 3 em 3, sem repetir, e calcular o muticamada de todos os dados

obs1: cuidado com a frequência (GHz pra Hz)

obs2: cuidado com a extensão (csv para txt)

obs3: cuidado para não alterar o .csv como vem do VNA, pois ele pula 15 linhas e não pega a última

#Verificar se o Diretório Existe

```
if os.path.exists("Fig"):
```

```
    print("O diretório Fig existe.")
```

```
else:
```

```
    os.mkdir('./Fig')
```

```
if os.path.exists("Simulado"):
```

```
    print("O diretório Simulado existe.")
```

```
else:
```

```
    os.mkdir('./Simulado')
```

```
# Ir para pasta Dados
```

```
local = os.getcwd()
```

```
os.chdir('./dados')
```

```
#Pegar os arquivos
```

```
TXT=[arquivos for arquivos in os.listdir(local+'./dados') if arquivos[len(arquivos)-4:] == '.txt']
```

```
F = []
```

```
samples=[[[],[]]] # samples = [[epsilon,...],[mu,...]]
```

```
count = 0
```

```
for arquivo in TXT:
```

```
    arq = open(arquivo,'r')
```

```
    lines = arq.readlines()
```

```
    arq.close()
```

```
        # Cria os Dict
```

```
        globals()[f'e%{str(count)}'] = {'real':[],'imag':[], 'd':float(lines[10][19:-5])*1e-3,  
'nome':arquivo[:-4]}
```

Fonte: Amaral Junior (2017).

Figura B.2 - Programa Python.

```
globals()['u%s'%str(count)] = {'real':[], 'imag':[], 'd':float(lines[10][19:-5])*1e-3,
'nome':arquivo[:-4]}

# Adiciona os Valores no Dict
for i in range(15,len(lines)-1):
    dados = lines[i].split(',')
    if count == 0:
        F.append(float(dados[0]))
    globals()['e%s'%str(count)]['real'].append(float(dados[1]))
    globals()['e%s'%str(count)]['imag'].append(float(dados[2]))
    globals()['u%s'%str(count)]['real'].append(float(dados[3]))
    globals()['u%s'%str(count)]['imag'].append(float(dados[4]))
    samples[0].append(globals()['e%s'%str(count)])
    samples[1].append(globals()['u%s'%str(count)])
    count +=1

#Mudar para pasta Fig
os.chdir(local)
os.chdir('./Fig')
c = 2.998e8 #[m/s]

#unica solucao que encontrei para fazer ambos (epsilon e mu) variarem juntos com com esse
zip()...
for sample1_e, sample1_u in zip(samples[0],samples[1]):
    for sample2_e, sample2_u in zip(samples[0],samples[1]):
        for sample3_e, sample3_u in zip(samples[0],samples[1]):

            if sample1_e['nome'] != sample2_e['nome'] and sample1_e['nome']
!=sample3_e['nome'] and sample2_e['nome'] != sample3_e['nome']:
                nome3 = sample3_e['nome'].split("_")
                d3 = sample3_e['d']

                nome2 = sample2_e['nome'].split("_")
                d2 = sample2_e['d']

                nome1 = sample1_e['nome'].split("_")
```

Fonte: Amaral Junior (2017).

Figura B.3 - Programa Python.

```
d1 = sample1_e['d']

grupo = "%.2fmm %s %s %s+%.2fmm %s %s %s+%.2fmm %s %s
%s+Metal"%(d3*1e3,nome3[3],nome3[2],nome3[1],d2*1e3,nome2[3],nome2[2],nome2[1],d1
*1e3,nome1[3],nome1[2],nome1[1])

S11=[]
i = 0
while i < 1601:
    f = F[i]*1e9
    e1 = sample1_e['real'][i]- 1j*sample1_e['imag'][i]
    u1 = sample1_u['real'][i]- 1j*sample1_u['imag'][i]
    #d1 = sample1_e['d']
    #Impedncia caracteristica (n)
    # 50 Ohm do cabo/guia
    zo = 50
    zn1 = zo*(u1/e1)**0.5

    e2 = sample2_e['real'][i]- 1j*sample2_e['imag'][i]
    u2 = sample2_u['real'][i]- 1j*sample2_u['imag'][i]
    #d2 = sample2_e['d']
    zn2 = zo*(u2/e2)**0.5

    e3 = sample3_e['real'][i]- 1j*sample3_e['imag'][i]
    u3 = sample3_u['real'][i]- 1j*sample3_u['imag'][i]
    #d3 = sample3_e['d']
    zn3 = zo*(u3/e3)**0.5

    #Calculo
    zin1 =
zn1*np.tanh((2j*np.pi*d1*f/c)*((u1*e1)**(1.0/2.0)))
```

Fonte: Amaral Junior (2017).

Figura B.4 - Programa Python.

```
                zin2 = zn2*(zin1 +
zn2*np.tanh(2j*np.pi*f*d2/c*np.sqrt(u2*e2)))/(zn2 +
zin1*np.tanh(2j*np.pi*f*d2/c*np.sqrt(u2*e2)))

                zin3 = zn3*(zin2 +
zn3*np.tanh(2j*np.pi*f*d3/c*np.sqrt(u3*e3)))/(zn3 +
zin2*np.tanh(2j*np.pi*f*d3/c*np.sqrt(u3*e3)))

                # DE LINEAR MAG PARA DB...

                #Coeficiente de Reflexao

                r = (zin3-zo)/(zin3+zo)

                # Linear Mag

                s11 = abs(r)

                # Log Mag

                db = 20*np.log10(s11)

                S11.append(db)

                i +=1

                #Plotar o Gráfico-----

                plt.plot(F,S11,label = grupo)

                plt.ylim(-30,0)

                plt.xlabel('Freq(GHz)')

                plt.ylabel('RL(dB)')

                plt.title(grupo)

                plt.legend(fontsize = 9)

                plt.grid()

                plt.savefig('./+grupo+_simulado.png')

                #plt.show()

                plt.close()

                #-----

                #Gravar os Dados

                os.chdir(local)

                os.chdir('./Simulado')

                arquivo = open('./+grupo+.txt','w')
```

Fonte: Amaral Junior (2017).

Figura B.5 - Programa Python.

```
arquivo.write("Freq (GHZ)\tRL(dB)\n")
for j in range(0,len(F)):
    escreva =
"%s\t%s\n"%(str(round(F[j],2)),str(round(S11[j],2)))
    arquivo.write(escreva)
arquivo.close()
os.chdir(local)
os.chdir('./Fig')

#plt.savefig('./Tudo.png')
#plt.show()
#plt.close()
```

Fonte: Amaral Junior (2017).

ANEXO B - FICHA CRISTALOGRÁFICA DA FERROCARBONILA

Figura C.1 - Ficha Cristalográfica ICDD 006-0696 da Ferrocarbonila.

Date: 4/15/2021 Time: 2:26:35 PM	File: 00-044-1290	User: suporte-las
<u>Name and formula</u>		
Reference code:	00-006-0696	
Mineral name:	Iron, syn	
Compound name:	Iron	
Common name:	ferrite	
PDF index name:	Iron	
Empirical formula:	Fe	
Chemical formula:	Fe	
<u>Crystallographic parameters</u>		
Crystal system:	Cubic	
Space group:	Im-3m	
Space group number:	229	
a (Å):	2.8664	
b (Å):	2.8664	
c (Å):	2.8664	
Alpha (°):	90.0000	
Beta (°):	90.0000	
Gamma (°):	90.0000	
Calculated density (g/cm ³):	7.87	
Volume of cell (10 ⁻⁶ cm ³):	23.55	
Z:	2.00	
RIR:	-	
<u>Subfiles and quality</u>		
Subfiles:	Alloy, metal or intermetallic Common Phase Educational pattern Forensic Inorganic Mineral NBS pattern	
Quality:	Star (S)	
<u>Comments</u>		
Color:	Gray, light gray metallic	
Creation Date:	1/1/1970	
Modification Date:	1/1/1970	
Color:	Gray, light gray metallic. Total impurities of sample <0.0013% each metals and non-metals	
Temperature of Data Collection:	Pattern taken at 25 C	
Sample Preparation:	The iron used was an exceptionally pure rolled sheet prepared at the NBS, Gaithersburg, Maryland, USA., [Moore, G., <i>J. Met.</i> , 5 1443 (1953)]. It was annealed in a H ₂ atmosphere for 3 days at 1100 C and slowly cooled in a He atmosphere. g-Fe (fcc)=(1390 C) d-Fe (bcc)	
Opaque mineral optical data on specimen from Meteorite:	RR ₂ R _g = 57.7, Disp.=16, VHN=158 (mean at 100, 200, 300), Color values=.311, .316, 57.9, Ref.: IMA Commission on Ore Microscopy QDF. Additional	

1 Of 2

Fonte: International Centre For Diffraction Data acesso em (15/04/2021).

Figura C.2 - Ficha Cristalográfica ICDD 006-0696 da Ferrocarbonila.

Date: 4/15/2021 Time: 2:26:35 PM

File: 00-044-1290

User: suporte-las

Patterns: See ICSD 64795 (PDF 85-1410).

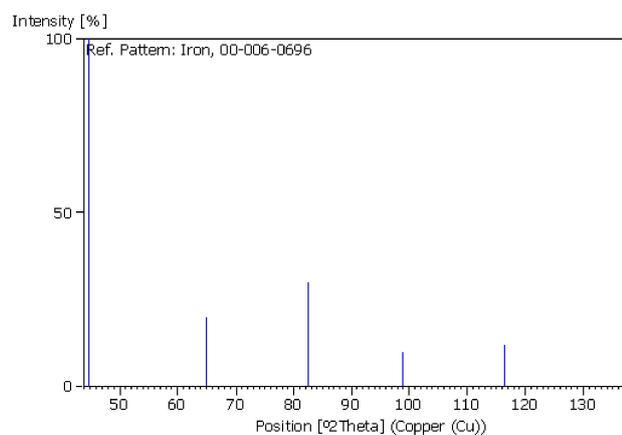
References

Primary reference: Swanson et al., *Natl. Bur. Stand. (U.S.), Circ. 539, IV, 3*, (1955)

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	1	1	0	2.02680	44.674	100.0
2	2	0	0	1.43320	65.023	20.0
3	2	1	1	1.17020	82.335	30.0
4	2	2	0	1.01340	98.949	10.0
5	3	1	0	0.90640	116.390	12.0
6	2	2	2	0.82750	137.144	6.0

Stick Pattern



2 Of 2

Fonte: International Centre For Diffraction Data acesso em (15/04/2021).