



UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ELETRICIDADE

PAULO HENRIQUE BEZERRA DE CARVALHO

DESENVOLVIMENTO DE UM ABSORVEDOR ELETROMAGNÉTICO TÊXTIL
APLICADO ÀS BANDAS 4G E 5G

São Luís

2026

PAULO HENRIQUE BEZERRA DE CARVALHO

**DESENVOLVIMENTO DE UM ABSORVEDOR ELETROMAGNÉTICO TÊXTIL
APLICADO ÀS BANDAS 4G E 5G**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Eletricidade da Universidade Federal do Maranhão, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia de Eletricidade, área de concentração: Automação e Controle de Processos Industriais.

Orientador: Prof. Ewaldo Eder Carvalho Santana, Dr.
Coorientador: Prof. Paulo Fernandes da Silva Júnior, Dr.

São Luís

2026

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Bezerra de Carvalho, Paulo Henrique.

DESENVOLVIMENTO DE UM ABSORVEDOR ELETROMAGNÉTICO TÊXTIL
APLICADO ÀS BANDAS 4G E 5G / Paulo Henrique Bezerra de
Carvalho. - 2026.
90 p.

Orientador(a): Ewaldo Eder Carvalho Santana Paulo
Fernandes da Silva Júnior.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em
Engenharia Elétrica/ccet, Universidade Federal do
Maranhão, São Luís, 2026.

1. Absorvedor Eletromagnético. 2. Material Absorvedor
de Micro-ondas. 3. Absorvedor A Base de Grafite. 4.
Permissividade Complexa. 5. Interferência
Eletromagnética. I. Paulo Fernandes da Silva Júnior,
Ewaldo Eder Carvalho Santana. II. Título.

PAULO HENRIQUE BEZERRA DE CARVALHO

**DESENVOLVIMENTO DE UM ABSORVEDOR ELETROMAGNÉTICO TÊXTIL
APLICADO ÀS BANDAS 4G E 5G**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Eletricidade da Universidade Federal do Maranhão, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia de Eletricidade, área de concentração: Automação e Controle de Processos Industriais.

Aprovado em ____ de ____ de 2026.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Ewaldo Eder Carvalho Santana
(Orientador UFMA)

Prof. Dr. Paulo Fernandes da Silva Júnior
(Coorientador UEMA)

Prof. Dr. Allan Kardec Duailibe Barros Filho
(Examinador, UFMA)

Prof. Dr. Francisco das Chagas de Souza
(Examinador, UFMA)

Prof. Dr. Jomar Sales Vasconcelos
(Examinador, IFMA)

Profa. Dra. Gricirene Sousa Correia
(Examinador, IFMA)

A Deus e aos meus pais, por me permitirem chegar até aqui. À minha esposa, pelo apoio e compreensão. Aos meus filhos, pelo amor que me renova todos os dias.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Paulo Fernandes da Silva Júnior, pela orientação segura e pela amizade sincera construída ao longo desta jornada.

Aos professores doutores Ewaldo Eder Carvalho Santana e Allan Kardec Duailibe Barros Filho, pela confiança ao me aceitarem no grupo de pesquisa da Universidade Federal do Maranhão (UFMA).

Ao Departamento de Eletromecânica do IFMA – Campus Monte Castelo e, em especial, ao Prof. Dr. Antônio Ernandes Macedo Paiva, pela permissão do uso dos laboratórios de materiais.

Aos doutores Clenilton Costa dos Santos e Ernesto Govea Alcaide, professores do Departamento de Física da UFMA, pelo suporte nas medições realizadas no Laboratório de Espectroscopia Vibracional e de Impedância (LEVI).

Ao Instituto Federal da Paraíba (IFPB) – Campus João Pessoa, pela cessão do Laboratório de Medidas em Telecomunicações.

À Profa. Dra. Úrsula do Carmo Resende, do Laboratório de Eletromagnetismo Aplicado do CEFET-MG, pela sua imensa prestatividade no compartilhamento de informações.

Ao Departamento de Eletroeletrônica do IFMA – Campus Monte Castelo, instituição à qual estou vinculado, e, de modo especial, ao coordenador do curso de Engenharia Elétrica, Prof. Dr. Orlando Donato Rocha Filho, pela flexibilidade de horários concedida.

RESUMO

Os materiais absorvedores são desenvolvidos com o objetivo de atenuar a radiação eletromagnética e garantir a compatibilidade de equipamentos eletrônicos em ambientes sujeitos a interferências. Embora as transmissões nas faixas de micro-ondas sejam essenciais para sistemas de comunicação, soluções de absorvedores são necessárias para reduzir a intensidade de sinais indesejáveis. Esta Tese apresenta um absorvedor eletromagnético têxtil, flexível e de baixo custo, voltado para as tecnologias 4G e 5G, operando nas frequências de 2,5 GHz e 3,5 GHz. O material desenvolvido consiste em um compósito de grafite natural e poli(álcool vinílico) (PVA) aplicado sobre um substrato de *denim*. As perdas eletromagnéticas do dispositivo baseiam-se na interação da onda incidente com a condutividade e a permissividade do material, caracterizando-o como um absorvedor do tipo resistivo. Para a comprovação da eficiência do dispositivo, foram fabricadas e testadas quatro amostras, com espessuras variando entre 0,96 mm e 1,05 mm, cujas caracterizações eletromagnéticas foram realizadas em um analisador de redes vetorial (VNA) na faixa de 2 GHz a 4 GHz. As propriedades elétricas foram analisadas para evidenciar o comportamento resistivo por meio de medições de condutividade e permissividade, utilizando os métodos das quatro pontas e da sonda coaxial, respectivamente. Para a identificação das propriedades estruturais e morfológicas do compósito, foram realizadas caracterizações por microscopia eletrônica de varredura (MEV), difração de raios X (DRX), espectroscopia Raman e espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR). Na faixa de interesse, os resultados revelaram atenuações significativas na faixa de 2 GHz a 3,5 GHz, com valores variando entre -11,89 dB (em 3,5 GHz) e -20,83 dB (em 2,14 GHz). A atenuação média foi de -16,96 dB na faixa de 2 GHz e 2,5 GHz, -16,93 dB entre 2,5 GHz e 3 GHz e -14,58 dB entre 3 GHz e 3,5 GHz. A amostra com melhor absorção apresentou condutividade em corrente contínua (CC) de 1,36 S/m, associada à permissividade imaginária no intervalo de $1 < \varepsilon_r'' < 1,2$ e tangente de perdas dielétricas entre $0,1 < \tan \delta < 0,15$. Com esses resultados, foi possível demonstrar a eficiência do absorvedor, a qual é caracterizada por perdas eletromagnéticas predominantemente por efeito Joule.

Palavras-chave: absorvedor eletromagnético têxtil; material absorvedor de micro-ondas; permissividade complexa; interferência eletromagnética; caracterização eletromagnética.

ABSTRACT

Absorbing materials are developed to attenuate electromagnetic radiation and ensure the compatibility of electronic equipment in environments subject to interference. Although microwave frequency transmissions are essential for communication systems, absorber solutions are required to reduce the intensity of unwanted signals. This Thesis presents a flexible and low-cost textile electromagnetic absorber designed for 4G and 5G technologies, operating at 2.5 GHz and 3.5 GHz. The developed material consists of a natural graphite and poly(vinyl alcohol) (PVA) composite applied onto a denim substrate. The electromagnetic losses of the device are based on the interaction of the incident wave with the conductivity and permittivity of the material, characterizing it as a resistive-type absorber. To verify the device efficiency, four samples were fabricated and tested, with thicknesses ranging from 0.96 mm to 1.05 mm, whose electromagnetic characterizations were performed using a Vector Network Analyzer (VNA) in the 2 GHz to 4 GHz frequency range. The electrical properties were analyzed to demonstrate its resistive behavior through conductivity and permittivity measurements, using the four-point probe and coaxial probe methods, respectively. To identify the structural and morphological properties of the composite, characterizations were performed by scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffraction (XRD), Raman spectroscopy, and Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR). In the frequency band of interest, the results revealed significant attenuation between 2 GHz and 3.5 GHz, with values ranging from -11.89 dB (at 3.5 GHz) to -20.83 dB (at 2.14 GHz). The average attenuation was -16.96 dB in the 2 GHz to 2.5 GHz range; -16.93 dB between 2.5 GHz and 3 GHz; and -14.58 dB between 3 GHz and 3.5 GHz. The sample with the best absorption performance presented a direct current (DC) conductivity of 1.36 S/m, associated with an imaginary permittivity in the range of $1 < \varepsilon'' < 1.2$ and a dielectric loss tangent between $0.1 < \tan \delta < 0.15$. These results demonstrated the efficiency of the absorber, which is characterized by electromagnetic losses predominantly driven by Joule heating.

Keywords: textile electromagnetic absorber; microwave absorbing material; complex permittivity; electromagnetic interference; electromagnetic characterization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mecanismos de polarização interfacial, orientacional, iônica e eletrônica	29
Figura 2 - Esquema representativo do mecanismo de perda na polarização	30
Figura 3 - Faixa de condutividades de alguns materiais	31
Figura 4 - Exemplos de absorvedores comerciais: a) piramidais; b) espumas; c) películas flexíveis.....	34
Figura 5 - Largura de banda do absorvedor.....	35
Figura 6 - Princípio de absorção eletromagnética: a) absorvedor genérico; b) absorvedor têxtil	36
Figura 7 - Ondas incidentes e resultantes no absorvedor	39
Figura 8 – Representação das portas do VNA e material absorvedor	40
Figura 9 - Estruturas alotrópicas do carbono: (a) diamante; (b) grafite	44
Figura 10 - Hibridização de orbitais dos carbonos do diamante e do grafite	45
Figura 11 - Ilustração da obtenção do grafite expandido	46
Figura 12 - Esquema da reação da hidrólise do PVAc para produzir PVA	47
Figura 13 - Estrutura da molécula do PVA	47
Figura 14 – Grafite natural em pó	49
Figura 15 - Solubilização do PVA	50
Figura 16 – Métodos de dispersão do pó de grafite na solução de PVA: (a) equipamento industrial; (b) hélice acoplada a uma parafusadeira	51
Figura 17 - Preparo do substrato denim para depósito do composto grafite/PVA.....	52
Figura 18 - Método do espaço livre.....	54
Figura 19 - Medição do parâmetro S_{21} do absorvedor pelo método do espaço livre.....	55
Figura 20 - Absorvedores comerciais: (a) espuma da Soliani EMC; (b) película da Shenzhen	55
Figura 21 - Medição do parâmetro S_{21} do absorvedor pelo método do espaço livre: (a) referência; (b) absorvedor grafite/PVA; (c) absorvedor comercial	56
Figura 22 – Método das quatro pontas em uma amostra retangular.....	58
Figura 23 - O eletrômetro	58
Figura 24 - Configuração na amostra para medição da condutividade	59
Figura 25 - Medição da condutividade com eletrômetro: (a) conexão do equipamento com a amostra; (b) detalhe da amostra.....	59
Figura 26 - Método da sonda coaxial	60
Figura 27 - Conexão do VNA na sonda coaxial.....	61
Figura 28 - OEM na sonda coaxial.....	61

Figura 29 - Medições das permissividades complexas dos materiais: (a) PVA; (b) grafite/PVA; (c) absorvedor	62
Figura 30 - Microscópio eletrônico de varredura do laboratório PPGMEC	63
Figura 31 - Difratorômetro de raios-X – RIGAKU - modelo SmartLab SE	63
Figura 32 - Espectrômetro Raman do LEVI.....	64
Figura 33 - Espectrômetro do infravermelho do laboratório CAMQ.....	65
Figura 34 - Comparação do parâmetro S21 do protótipo com o absorvedor comercial: (a) valores absolutos de 1 a 6 GHz; (b) valores absolutos de 2 a 4 GHz; (c) valores relativos de 2 a 4 GHz	66
Figura 35 - Comparação do parâmetro S21, do Absorvedor 1 e o absorvedor comercial: (a) valores absolutos de 1 a 6 GHz; (b) valores absolutos de 2 a 4 GHz; (c) valores relativos de 2 a 4 GHz	69
Figura 36 - Comparação do parâmetro S21, do Absorvedor 2 e o absorvedor comercial: (a) valores absolutos de 1 a 6 GHz; (b) valores absolutos de 2 a 4 GHz; (c) valores relativos de 2 a 4 GHz	70
Figura 37 - Comparação do parâmetro S21 do Absorvedor 3 e o absorvedor comercial: (a) valores absolutos de 1 a 6 GHz; (b) valores absolutos de 2 a 4 GHz; (c) valores relativos de 2 a 4 GHz	72
Figura 38 - Comparação do parâmetro S21 do Absorvedor 4 e o absorvedor comercial: (a) valores absolutos de 1 a 6 GHz; (b) valores absolutos de 2 a 4 GHz; (c) valores relativos de 2 a 4 GHz	74
Figura 39 - Medições das permissividades e tangente de perdas da solução de PVA	79
Figura 40 - Medições das permissividades e tangente de perdas do compósito de grafite/PVA .	79
Figura 41 - Medições das permissividades e tangente de perdas do absorvedor têxtil	79
Figura 42 - MEV do grafite nas escalas (a) 200 μm e (b) 50 μm ; compósito grafite/PVA (c) 200 μm e (d) 50 μm	83
Figura 43 - DRX do grafite e do compósito de grafite/PVA.....	84
Figura 44 – Espectroscopia Raman do grafite e compósito de grafite/PVA.....	85
Figura 45 - FTIR do grafite e do compósito de grafite/PVA	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resumo do estado da arte	23
Tabela 2 - Resumo do estado da arte (continuação)	24
Tabela 3 - Classificação dos absorvedores eletromagnéticos.....	33
Tabela 4 - Resumo simplificado das dimensões nominais da Tabela 4 I da ASTM E11	49
Tabela 5 - Comparação das técnicas de medição de materiais absorvedores eletromagnéticos ..	53
Tabela 6 - Vantagens e limitações das técnicas de medição de absorvedores eletromagnéticos .	54
Tabela 7 - Dimensões das amostras dos absorvedores	68
Tabela 8 - Resumo do desempenho do Absorvedor 1 em relação ao absorvedor comercial	70
Tabela 9 - Resumo do desempenho do Absorvedor 2 em relação ao absorvedor comercial	72
Tabela 10 - Resumo do desempenho do Absorvedor 3 em relação ao absorvedor comercial	73
Tabela 11 - Resumo do desempenho do Absorvedor 4 em relação ao absorvedor comercial	75
Tabela 12 - Resultados das medições das condutividades das amostras dos absorvedores	77
Tabela 13 - Estatísticas das medições das condutividades das amostras dos absorvedores.....	77
Tabela 14 - Resumo das medições dielétricas na faixa de 2 GHz a 4 GHz.....	80
Tabela 15 - Impedância de entrada estimada em 2,5 GHz e 3,5 GHz	82

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

4G	<i>Fourth generation</i> - Quarta geração
5G	<i>Fifth generation</i> - Quinta geração
AC	<i>Alternating current</i> – Corrente alternada
CC	Corrente continua
DC	<i>Direct current</i> – Corrente contínua
DRX	<i>X-ray Diffractometry</i> - Difractometria de Raios X
FTIR	<i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy</i> - Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier
MEV	<i>Scanning Electron Microscopy Micrograph</i> - Micrografia por Microscopia Eletrônica de Varredura
NIST	<i>National Institute of Standards and Technology</i>
NRW	<i>Nicholson Ross Weir methods</i> – Método Nicholson Ross Weir
OEM	Onda eletromagnética
PVA	<i>Poly(vinyl alcohol)</i> - Poli (álcool vinílico)
PVAc	<i>Poly(vinyl acetate)</i> - Poli(acetato de vinila)
RFM:	<i>Rational function model</i> - Modelo de função racional
S_{11}	<i>Reflection scattering parameter</i> – Parâmetro S_{11} de reflexão
S_{21}	<i>Transmission scattering parameter</i> - Parâmetro S_{21} de transmissão
VNA	<i>Vector network analyzer</i> - Analisador de rede vetorial

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área
c	Velocidade da luz
f	Frequência temporal
E	Campo elétrico
E_s	Intensidade de campo elétrico na forma fasorial
H	Intensidade de campo magnético
H_s	Intensidade de campo magnético na forma fasorial
J	Densidade de corrente de elétrica
$P(dB)$	Potência em decibéis
R_L	Perda de reflexão
R	Resistência
$tg \delta$	Tangente de perdas
Z_{in}	Impedância de entrada
Z_0	Impedância no espaço livre
∇	Operador nabla
Δf	Largura de banda
ε	Permissividade elétrica complexa
ε_0	Permissividade elétrica do vácuo
ε_r	Permissividade relativa complexa
ε'	Termo real da permissividade complexa
ε''	Termo imaginário da permissividade complexa
ε'_r	Termo real da permissividade relativa complexa
ε''_r	Termo imaginário da permissividade relativa complexa
ε''_{rd}	Termo imaginário da perda por polarização
ε_{rdc}	Termo real da permissividade relativa em $\omega = 0$
$\varepsilon_{r\infty}$	Termo real da permissividade relativa em $\omega \rightarrow \infty$
λ	Comprimento de onda
μ	Permeabilidade magnética complexa
μ_0	Permeabilidade magnética do vácuo

μ	Permeabilidade complexa
μ'	Termo real da permeabilidade complexa
μ''	Termo imaginário da permeabilidade complexa
μ_r	Permeabilidade relativa complexa
ρ	Resistividade
σ	Condutividade
σ_{ef}	Condutividade efetiva
δ	Ângulo de perdas do meio
δ_G	Espessura do compósito do absorvedor
δ_T	Espessura do substrato do absorvedor
τ	Tempo de relaxamento
ω	Frequência angular

SUMÁRIO

RESUMO.....	6
ABSTRACT	7
LISTA DE FIGURAS.....	8
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	11
LISTA DE SÍMBOLOS	12
1 INTRODUÇÃO	17
1.1 Problema.....	18
1.2 Justificativa.....	18
1.3 Objetivos.....	19
1.3.1 Objetivo geral	19
1.3.2 Objetivos específicos.....	19
1.4 Organização do trabalho	19
2 ESTADO DA ARTE	21
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	25
3.1 Dielétricos sem perdas e com perdas.....	25
3.2 Tangente de perdas	26
3.3 Mecanismos de polarização e perdas.....	28
3.4 Efeito da condutividade na tangente de perdas	31
3.4.1 Condutividade CC e CA em meio com perdas	32
3.5 Absorvedores eletromagnéticos.....	33
3.6 Princípio da absorção eletromagnética	35
3.7 Casamento de impedância do absorvedor	36
3.8 Analisador de rede vetorial.....	39
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	43
4.1 Grafite.....	43
4.2 Poli (álcool vinílico) (PVA)	46
4.3 Método de Fabricação do Absorvedor.....	48
4.3.1 Materiais utilizados na fabricação do absorvedor	48
4.3.2 Preparação do absorvedor.....	51
4.4 Métodos de caracterização.....	52
4.4.1 Caracterização eletromagnética.....	53
4.4.2 Caracterização elétrica.....	57

4.5	Caracterizações morfológicas e estruturais	62
4.5.1	Micrografia por microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	62
4.5.2	Difratometria de raios X (DRX).....	63
4.5.3	Espectroscopia Raman.....	64
4.5.4	Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)	64
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	66
5.1	Caracterização eletromagnética.....	66
5.2	Caracterização elétrica.....	75
5.2.1	Medição da condutividade CC	76
5.2.2	Medição da permissividade efetiva	78
5.3	Caracterizações morfológicas e estruturais	82
5.3.1	Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	82
5.3.2	Difratometria de raios X (DRX).....	83
5.3.3	Espectroscopia Raman.....	84
5.3.4	Espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)	85
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	87
6.1	Publicação.....	87
6.2	Trabalhos futuros.....	88
	REFERÊNCIAS	89

1 INTRODUÇÃO

Materiais absorvedores de radiação eletromagnética são estruturas capazes de absorver energia incidente, com dissipação pelo efeito Joule ou pelo cancelamento mútuo das fases das ondas incidentes e refletidas (Kotsuka, 2019). Desenvolvidos para uso militar, os absorvedores de radiação eletromagnética são aplicados para camuflar aeronaves, tanques ou navios em tecnologias stealth (Batista, et al., 2020). Com o desenvolvimento de padrões de compatibilidade e proteção contra interferência eletromagnética nas áreas da indústria, transporte, telecomunicações e medicina, o uso de absorvedores eletromagnéticos passou a garantir o funcionamento de dispositivos e sistemas que irradiam energia eletromagnética. A expansão das comunicações sem fio terrestres e via satélite, serviços móveis 5G e 6G, indústria 4.0, Internet das Coisas, fazendas inteligentes, cidades inteligentes, Smart Grid, entre outras tecnologias que utilizam o espectro eletromagnético, singulares na necessidade de não interferência e acoplamento eletromagnético, têm proporcionado diversos avanços nas pesquisas sobre materiais absorvedores de ondas eletromagnéticas (Morais, 2023).

A propriedade de absorção de ondas eletromagnéticas a partir de absorvedores é obtida através das características elétricas de condutividade, permissividade e permeabilidade dos materiais. As propriedades podem ser utilizadas isoladamente ou em combinação, a fim de obter melhor absorção. Os materiais absorvedores podem ser classificados de acordo com o mecanismo de absorção, sendo divididos em resistivos, dielétricos e magnéticos (Duan & Guan, 2017) (Chang, Liu, Zhang, & Liu, 2019). O absorvedor do tipo resistivo baseia-se na interação da onda incidente com os parâmetros de condutividade e permissividade do material. São exemplos de materiais absorvedores resistivos, o composto negro de fumo, o grafite, carboneto de silício e materiais à base de metal. O absorvedor do tipo dielétrico atua na permissividade, a partir da perda no processo de polarização e relaxamento das cargas polarizadas da estrutura do material, sendo empregados para este fim, materiais como o titanato de bário, cerâmicas ferroelétricas e materiais contendo carbono, como espumas de borracha, uretano ou poliestireno. O absorvedor do tipo magnético se baseia nas perdas por ressonância e histerese, sendo utilizadas a ferrita e ferrocarbonila.

A combinação de diferentes tipos de materiais pode ser empregada a fim de melhorar a eficiência de absorção do absorvedor (Chang, Liu, Zhang, & Liu, 2019). Segundo Chung (2004) e Aswathi (2019), a suspensão de pó de grafite em líquido, água, álcool, óleo de petróleo ou outros,

misturado em quantidade com um ligante polimérico é chamada de coloide de grafite. O revestimento de grafite coloidal aplicado em uma superfície produzirá a formação de um material condutor através do contato direto das partículas de grafite, devido à evaporação completa do líquido; o material resultante pode ser utilizado como blindagem eletromagnética. A escolha dos tipos de grafite e polímero utilizados no coloide, associada às suas dosagens e ao método de preparação, é importante na determinação da resposta em frequência do absorvedor.

1.1 Problema

Equipamentos eletrônicos e eletrodomésticos, quando ligados, são fontes de ruídos e sinais impulsivos eletromagnéticos indesejáveis que podem prejudicar a operação de outros dispositivos eletrônicos, como por exemplo, sensores e atuadores. Sistemas de comunicação, embora necessários, transmitem sinais eletromagnéticos em frequências que, dependendo do ambiente ou aplicação, precisam ser desconsideradas e eliminadas, por exemplo, em câmaras anecoicas e em presídios. A operação segura de circuitos eletrônicos, pode ser avaliada a partir da compatibilidade e redução da interferência eletromagnética, procurando garantir a operação segura de equipamentos instalados em hospitais, veículos, aviões, dispositivos junto ao corpo e nas indústrias, podendo ser tratada em nível de hardware e *software* (Kannadhasan, S. et al., 2022), (Christopoulos, 2023).

Compatibilidade eletromagnética se ocupa do projeto e da operação de equipamentos para torná-los imunes a certas quantidades de interferência eletromagnética, mantendo a interferência gerada pelo equipamento dentro de limites especificados por um órgão regulador (Christopoulos, 2023). As diversas interferências incidentes nos circuitos eletrônicos devem ser tratadas, algumas delas em nível de software, com o uso de programas que reconhecem os ruídos produzidos e os separam, tornando os sistemas mais eficientes. Outras aplicações necessitam tratamento em nível de hardware, com dispositivos físicos que atuam na redução da intensidade do campo eletromagnético incidente sobre os circuitos, promovendo ganhos na qualidade dos seus funcionamentos.

1.2 Justificativa

Os materiais absorvedores de radiações eletromagnéticas são necessários para suprimir ou reduzir a “poluição” eletromagnética que prejudica o funcionamento de sistemas de transmissão e dispositivos eletrônicos utilizados na medicina, transportes e indústrias. Novas pesquisas estão

produzindo materiais absorvedores cada vez mais eficientes, com o uso de materiais compósitos absorvedores, polímeros condutivos, cerâmicas e outros materiais, porém o desafio atual é associar a eficiência ao baixo custo de produção, leveza, flexibilidade e adequação aos diferentes ambientes.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver um absorvedor de ondas eletromagnéticas têxtil, construído em denim, sendo de baixo custo, leve e flexível, composto por um compósito de grafite e poli(álcool vinílico) (PVA), operando nas frequências de 2,5 GHz e 3,5 GHz, correspondentes às comunicações móveis nas bandas 4G e 5G.

1.3.2 Objetivos específicos

Para obtenção do objetivo geral são indicados os seguintes objetivos específicos:

- a) realizar a pesquisa bibliográfica em periódicos especializados sobre absorvedores eletromagnéticos;
- b) identificar os principais materiais para uso nos absorvedores;
- c) propor materiais de baixo custo para o desenvolvimento do projeto;
- d) medir os níveis de absorção do absorvedor construído através da caracterização eletromagnética;
- e) realizar as caracterizações químicas e físicas dos materiais utilizados no projeto.

1.4 Organização do trabalho

Com intuito de alcançar os objetivos propostos, este trabalho é composto, além desta Introdução, dos seguintes capítulos:

- a) na seção 2 é apresentado o estado da arte;
- b) na seção 3 são apresentadas as fundamentações teóricas nas quais se baseou a proposta deste trabalho;
- c) na seção 4 são apresentados os materiais e os métodos utilizados na fabricação do absorvedor eletromagnético, e são explicadas as técnicas de caracterização escolhidas para comprovar a eficiência do absorvedor produzido;

- d) na seção 5 são apresentadas as medições e caracterizações obtidas, seguidas das discussões dos resultados;
- e) e na seção 6 são feitas as considerações finais, menção à publicação realizada com a indicação dos trabalhos futuros.

2 ESTADO DA ARTE

Diversos trabalhos buscam desenvolver absorvedores de ondas eletromagnéticas em diferentes frequências e com diferentes tipos de técnicas e materiais. No trabalho de D'Aloia *et al.* (2022) foi proposto um absorvedor têxtil revestido com fluoreto de polivinilideno, preenchido com nanoplaquetas de grafeno, com largura de banda mínima em -10 dB de 5 GHz e coeficiente de reflexão abaixo de -5 dB em toda a faixa de 8 GHz a 18 GHz. No trabalho de Wang, Su e Wang (2022) foi desenvolvido um absorvedor com espessura de 4 mm, constituído por um compósito de magnetita (Fe_3O_4) e grafite operando na banda C (4 GHz a 8 GHz), com perda máxima de retorno de -40,6 dB, e -29,82 dB na banda Ku, 12 GHz a 18 GHz. Em Zhao *et al.* (2022) foi desenvolvido um absorvedor de micro-ondas feito a partir de derivados de biomassa, um híbrido de nanopartículas de liga Co_3Fe_7 , ancoradas em nanofolhas de carbono porosas derivadas da casca da toranja, com perda de reflexão de -22,3 dB numa largura de absorção de 5,3 GHz na banda Ku.

No trabalho de Ghosh e Srivastava (2021), um absorvedor de micro-ondas foi preparado a partir do complexo de ureia de manganês/cobalto e óxido de grafite reduzido e dopado com nitrogênio, pelo método hidrotérmico, operando na faixa de 2 GHz a 8 GHz, obtendo perdas de reflexão abaixo de -77 dB e mínimo de -103 dB em 2,9 GHz. O trabalho de Batista *et al.* (2020) avaliou absorvedores utilizando as morfologias de grafite intercalado, grafite expandido e grafite esfoliado, operando na banda X, 8 GHz a 12 GHz, e na banda Ku, 12 GHz a 18 GHz, cujos melhores resultados foram obtidos com o grafite expandido com atenuação máxima de -22,5 dB para amostras de 2 mm. Um absorvedor de 2 mm de espessura construído com nanocompósitos de dupla camada de negro de fumo/resina epóxi e ferrite de níquel-zinco/resina epóxi foi desenvolvido por Ibrahim, *et al.* (2020), operando nas faixas de frequência de 8 GHz a 18 GHz, obtendo uma perda de reflexão de -24,0 dB e -33,8 dB com larguras de 4,8 GHz e 2,7 GHz. No trabalho de Chang *et al.* (2019) são avaliados três absorvedores de grafeno/ferrita, grafeno/polímero condutor e compósitos ternários à base de grafeno, operando nas bandas de 2 GHz a 18 GHz. Os melhores resultados apontaram para o compósito de grafeno/polianilina na espessura de 2 mm, com perdas de reflexão abaixo de -10 dB na faixa entre 12 GHz e 16,5 GHz.

Um absorvedor com comportamento de metamaterial, composto de grafite, foi desenvolvido por Chen, *et al.* (2019) e avaliado na faixa de 2 GHz a 18 GHz, com taxa de absorção abaixo de -10 dB entre 12,7 e 18 GHz. Em Wu *et al.* (2019) foi apresentado um compósito absorvedor de sulfeto de cobalto-fluoreto de polivinilideno, operando nas bandas de 2 GHz a 18

GHz, com absorção máxima de -43 dB em 6,6 GHz. Em Mahanta *et al.* (2019) foi apresentado um absorvedor de micro-ondas de camada única com suporte metálico baseado em compósitos de resina fenólica novolaca reforçada com polianilina/grafite expandido avaliado na faixa de 8,2 GHz a 12,4 GHz, obtendo-se uma perda de reflexão de -32 dB em 9,7 GHz com e -10 dB em uma largura de 2,4 GHz na espessura de 3 mm.

Um absorvedor de micro-ondas foi apresentado em Ismail, *et al.* (2019), produzido com a combinação de camadas de ferrita de cobalto e grafite, operando entre 8 GHz e 18 GHz, sendo que na espessura de 3 mm a configuração ferrite de cobalto/grafite obteve máxima perda de reflexão de -15 dB em 10 GHz e na configuração grafite/ferrite de cobalto a perda de reflexão máxima foi de -12,8 GHz em 8 GHz. No trabalho de Jia, *et al.* (2017), um compósito ternário de óxido de titânio/polianilina/óxido de grafeno foi sintetizado por meio de uma polimerização de oxidação *in situ*, obtendo um pico de perda de reflexão de -51,74 dB em 9,67 GHz, com -10 dB em uma largura de 3,91 GHz na espessura de 3,12 mm, e perda de -15,28 em 10,28 GHz com -10 dB em uma largura de 4,76 GHz na espessura de 2,5 mm. Em Xie, *et al.* (2016) foi apresentado um composto de grafite microcristalino natural e polietileno de baixa densidade preparado pelo método de calandragem por extrusão avaliado na faixa de 2 GHz a 18 GHz, obtendo atenuações abaixo de -5 dB e -10 dB com larguras de 6,79 GHz e 3,02 GHz, e picos de -12,44 dB e -20,46 dB nas mesmas faixas.

Os principais trabalhos de desenvolvimento de absorvedores pesquisados estão resumidos na Tabela 1. No trabalho relacionado ao tema foi encontrado apenas um absorvedor têxtil em D'Aloia *et al.* (2022), operando na faixa de 8 GHz a 18 GHz. A maioria dos trabalhos propõe absorvedores nas faixas das bandas X e Ku, que correspondem a frequências acima de 8 GHz. No estado da arte pesquisado, apenas três trabalhos cobrem as faixas de 4G e de 5G, porém nenhum deles desenvolve solução com tecido *denim* (jeans), e grafite, operando com a absorção do componente de campo elétrico da onda eletromagnética. Desse modo, o trabalho proposto pode ser identificado com uma oportunidade de pesquisa e desenvolvimento de soluções de baixo custo, flexíveis, e adaptáveis a frequências mais baixas, como as utilizadas nas comunicações das tecnologias de 4G e 5G brasileiras.

Tabela 1 - Resumo do estado da arte

Título do Artigo	Autor Ano	Descrição	Resultado
Graphene Based Wideband Electromagnetic Absorbing Textiles at Microwave Bands.	D'Aloia <i>et al.</i> (2022)	Absorvedor têxtil revestido com fluoreto de polivinilideno, preenchido com nanoplaças de grafeno, operando na faixa de 8 GHz a 18 GHz.	Largura de banda mínima em -10 dB de 5 GHz e coeficiente de reflexão abaixo de -5 dB em toda a faixa de 8 GHz a 18 GHz.
Fe ₃ O ₄ - Graphite Composites as a Microwave Absorber with Bimodal Microwave Absorption.	Wang, Su, e Wang (2022)	Absorvedor com espessura de 4 mm, constituído de um compósito de Fe ₃ O ₄ e grafite avaliado nas bandas C (4 GHz a 8 GHz) e Ku (12 GHz a 18 GHz).	Pico de perda máxima de retorno de -40,6 dB na banda C (4 GHz a 8 GHz) e -29,82 dB na banda Ku (12 GHz a 18 GHz)
Biomass-derived ultralight superior microwave absorber Towards X and Ku bands.	Zhao <i>et al.</i> (2022)	Absorvedor de micro-ondas feito a partir de derivados de biomassa, um híbrido de nanopartículas de liga Co ₃ Fe ₇ , ancoradas em nanofolhas de carbono porosas.	Perda de reflexão de -22,3 dB numa largura de absorção de 5,3 GHz na banda Ku.
Fabrication of N-Doped Reduced Graphite Oxide/ MnCo ₂ O ₄ Nanocomposites for Enhanced Microwave Absorption Performance.	Ghosh e Srivastava (2021)	Absorvedor de micro-ondas preparado a partir do complexo de ureia de manganês/cobalto e óxido de grafite reduzido e dopado com nitrogênio pelo método hidrotérmico operando na faixa de 2 GHz a 8 GHz.	A perda de reflexão na faixa variou de -90 a -77 dB com mínimo de -103 dB em 2,9 GHz.
Investigation of different graphite morphologies for microwave absorption at X and Ku-band frequency range.	Batista, <i>et al.</i> (2020)	Absorvedores utilizando as morfologias de grafite intercalado, grafite expandido e grafite esfoliado, operando na banda X, 8 GHz a 12 GHz, e na banda Ku, 12 GHz a 18 GHz.	Atenuação máxima de -22,5 dB para amostras de 2 mm na banda X
A Study on Microwave Absorption Properties of Carbon Black and Ni _{0,6} Zn _{0,4} Fe ₂ O ₄ Nanocomposites by Tuning the Matching-Absorbing Layer Structures.	Ibrahim, <i>et al.</i> (2020)	Nanocompósitos de dupla camada de negro de fumo/resina epóxi e ferrite/resina epóxi operando nas faixas de frequência de 8 GHz a 18 GHz.	Perdas de reflexão de -24,0 dB e -33,8 dB com larguras de 4,8 GHz e 2,7 GHz.
Graphene-based Absorbing Material.	Chang <i>et al.</i> (2019)	Avaliação de três absorvedores: grafeno/ferrita, grafeno/polímero condutor e compósitos ternários à base de grafeno, operando nas bandas de 2 GHz a 18 GHz.	Os melhores resultados apontaram para o compósito de grafeno/polianilina na espessura de 2 mm, com perdas de reflexão abaixo de -10 dB na faixa entre 12 GHz e 16,5 GHz.

Fonte: Autoria própria (2026).

Tabela 2 - Resumo do estado da arte (continuação)

Título do Artigo	Autor Ano	Descrição	Resultado
A Graphite-Based Metamaterial Microwave Absorber.	Chen, <i>et al.</i> (2019)	Um absorvedor com comportamento de metamaterial, composto de grafite, foi desenvolvido e avaliado na faixa de 2 GHz a 18 GHz	Taxa de absorção abaixo de -10 dB entre operando nas bandas de 12,7 GHz a 18 GHz
Enhanced Wave Absorption and Mechanical properties of Cobalt Sulfide/PVDF Composite Materials.	Wu, <i>et al.</i> (2019)	Compósito absorvedor de sulfeto de cobalto-fluoreto de polivinilideno, operando na faixa de 2 GHz a 18 GHz.	Absorção máxima de -43 dB em 6,6 GHz.
Dielectric characterization and microwave absorption of expanded graphite integrated polyaniline multiphase nanocomposites in X-band.	Mahanta, <i>et al.</i> (2019)	Absorvedor de micro-ondas de camada única com suporte metálico baseado em compósitos de resina fenólica novolaca reforçada com polianilina/grafite expandido avaliado na faixa de 8,2 GHz a 12,4 GHz	Perda de reflexão de -32 dB em 9,7 GHz com e -10 dB em uma largura de 2,4 GHz na espessura de 3 mm.
Single- and Double-Layer Microwave Absorbers of Cobalt Ferrite and Graphite Composite at Gigahertz Frequency	Ismail, <i>et al.</i> (2019)	Um Absorvedor de micro-ondas produzido com a combinação de camadas de ferrita de cobalto e grafite, operando na faixa de 8 GHz a 18 GHz	Com 3 mm de espessura a configuração ferrite de cobalto/grafite obteve perda de reflexão de -15 dB em 10 GHz. Na configuração grafite/ferrite de cobalto a perda de reflexão foi de -12,8 dB em 8 GHz.
Synthesis and characterization of TiO ₂ /polyaniline/graphene oxide bouquet-like composites for enhanced microwave absorption performance.	Jia, <i>et al.</i> (2017)	Compósito ternário de óxido de titânio/polianilina/óxido de grafeno foi sintetizado por meio de uma polimerização de oxidação <i>in situ</i> .	Perda de reflexão de -51,74 dB em 9,67 GHz, com -10 dB numa largura de 3,91 GHz na espessura de 3,12 mm, e perda de -15,28 dB em 10,28 GHz com largura -10 dB numa largura de 4,76 GHz na espessura de 2,5 mm.
Electromagnetic absorption properties of natural microcrystalline graphite.	Xie, <i>et al.</i> (2016)	composto de grafite microcristalino natural e polietileno de baixa densidade preparado pelo método de calandragem por extrusão .	Atenuações abaixo de -5 dB e -10 dB com larguras de 6,79 GHz e 3,02 GHz, e picos de -12,44 dB e -20,46 dB nas mesmas faixas.

Fonte: Autoria própria (2026).

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A condutividade (σ) e permissividade (ε) são propriedades intrínsecas dos materiais que, dependendo de suas grandezas, determinam tangentes de perdas capazes de produzir a atenuação das ondas eletromagnéticas do absorvedor. Neste capítulo são apresentadas as bases teóricas necessárias para o entendimento da absorção eletromagnética proposta neste trabalho.

3.1 Dielétricos sem perdas e com perdas

A propagação das ondas eletromagnéticas em um meio é analisada a partir das seguintes equações de Maxwell:

$$\nabla \cdot \mathbf{E}_s = \rho_v, \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{H}_s = 0, \quad (2)$$

$$\nabla \times \mathbf{E}_s = -j\omega\mu\mathbf{H}_s, \quad (3)$$

$$\nabla \times \mathbf{H}_s = (\sigma + j\omega\varepsilon)\mathbf{E}_s, \quad (4)$$

em que $\mathbf{E}_s$ é o vetor campo elétrico e $\mathbf{H}_s$ o vetor campo magnético que se propagam em um meio, μ é a permeabilidade magnética do meio, σ é condutividade do meio, ω é a frequência angular e ε é a permissividade elétrica do meio.

De acordo com as equações (3) e (4), as propagações dos campos elétrico e magnético dependem das relações constitutivas ε e μ do material que compõe o meio. O campo magnético está associado à permeabilidade $\mu = \mu_r\mu_0$, enquanto o campo elétrico à permissividade $\varepsilon = \varepsilon_r\varepsilon_0$.

Para um meio dielétrico, leva-se em consideração apenas as características de permissividade do material. No entanto, se esse mesmo material dielétrico tiver uma condutividade finita, com $\sigma \neq 0$, será estabelecida uma corrente de condução no meio.

Um dielétrico é considerado sem perdas se não existir corrente de condução no material, e se a frequência de polarização de suas cargas estiver em ressonância com o campo elétrico variável incidente, sendo nesse caso, ε uma grandeza real podendo ser substituída por ε' . A equação (4) para um dielétrico sem perdas torna-se:

$$\nabla \times \mathbf{H}_s = j\omega\epsilon' \mathbf{E}_s. \quad (5)$$

Um dielétrico é considerado com perdas se existir uma corrente de condução no material ou se a frequência de polarização de suas cargas não estiver em ressonância com o campo elétrico variável incidente. Nesse caso, ϵ assume um valor complexo, composto por uma parte real, ϵ' , e uma parte imaginária, ϵ'' . A equação (4) para um dielétrico com perdas, causadas por σ e ϵ'' , torna-se:

$$\nabla \times \mathbf{H}_s = [\sigma + j\omega(\epsilon' - j\epsilon'')] \mathbf{E}_s. \quad (6)$$

3.2 Tangente de perdas

Absorvedores eletromagnéticos são desenvolvidos baseados nas propriedades da permissividade elétrica complexa (ϵ_c), permeabilidade magnética complexa (μ_c), condutividade (σ) e frequências angulares das ondas incidentes (ω), com $\omega = 2\pi f$. As interações dessas grandezas com as ondas eletromagnéticas incidentes no material, dependendo das frequências, podem causar perdas elétricas e magnéticas, identificadas pelas tangentes de perdas elétricas e magnéticas. O desempenho de um absorvedor está associado ao dimensionamento da área, espessura, escolha do tipo de material e às diferentes faixas de frequência de operação do sistema. O absorvedor proposto neste trabalho considera a resposta dielétrica, sendo a permissividade, condutividade, frequência angular e tangente de perda, como parâmetros importantes para determinação da sua resposta de absorção eletromagnética.

Um dielétrico não perfeito possui uma certa perda causada pela condutividade finita e pela polarização, de modos isolados ou combinados. De acordo com a lei de Ohm, a presença de um campo elétrico no interior de um dielétrico produz uma densidade de corrente de condução, expressa por:

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}, \quad (7)$$

em que $\mathbf{E}$ corresponde ao campo elétrico incidente no material, que resulta na dissipação de energia na forma de calor e, como resultado, na atenuação da onda incidente devido à perda de condutividade (Wentworth, 2009). A perda por polarização é causada pela incapacidade dos dipolos das moléculas do dielétrico de seguirem a taxa de variação do campo elétrico aplicado. Se o tempo de relaxamento dos dipolos para retornarem ao seu estado aleatório inicial for menor ou

comparável à taxa de oscilação elétrica do campo, então não haverá perda. Quando a taxa do campo elétrico oscilar bem mais rápido que o tempo de relaxamento, a polarização não consegue seguir a oscilação de frequência, resultando em dissipação de energia na forma de calor (Ahmad, 2012).

As perdas por polarização produzem uma condutividade equivalente $\omega\epsilon''$, que é somada à condutividade em corrente contínua (ou por condução). A condutividade efetiva total do material é dada por (Wentworth, 2009)

$$\sigma_{ef} = \sigma + \omega\epsilon'', \quad (8)$$

na qual a parte imaginária da permissividade ϵ'' pode ser expressa em função das permissividades no vácuo (ϵ_0) e relativa (ϵ_r''):

$$\epsilon'' = \epsilon_r'' \epsilon_0. \quad (9)$$

Segundo Pozar (2012), a perda devido à condutividade causada pelo amortecimento dielétrico ($\omega\epsilon''$) é indistinguível da perda por condutividade (σ), e o termo $(\sigma + \omega\epsilon'')$ pode então ser considerado como a perda por condutividade efetiva total ou perda dielétrica total. Nas equações (8) e (9), ϵ'' corresponde à parte imaginária da permissividade complexa, que está associada às perdas causadas pela interação do campo elétrico com o material.

A componente real associada a capacidade de armazenamento do campo elétrico no material é dada por:

$$\epsilon' = \epsilon_r' \epsilon_0. \quad (10)$$

A constante dielétrica indica quanto de energia de um campo externo foi armazenada no dielétrico devida à polarização. A permissividade complexa pode ser obtida por (Wentworth, 2009):

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''. \quad (11)$$

A partir da equação de Maxwell é possível relacionar os valores intrínsecos do material com o campo elétrico incidente:

$$\nabla \times \mathbf{H}_s = \sigma \mathbf{E}_s + j\omega(\varepsilon' - j\varepsilon'')\mathbf{E}_s = [(\sigma + \omega\varepsilon'') + j\omega\varepsilon']\mathbf{E}_s. \quad (12)$$

A tangente de perdas é uma medida que expressa o quanto do campo elétrico incidente em um material é dissipado e quanto é armazenado, podendo, portanto, ser obtida a partir da equação (12). A tangente de perda é a relação entre as perdas de um material e sua capacidade de armazenamento de campo elétrico, conforme equação (13). O ângulo δ é denominado de ângulo de perdas do meio, podendo variar de $0^\circ \leq \delta < 90^\circ$. Embora não haja uma fronteira bem definida entre bons condutores e dielétricos com perdas, um meio é dito um bom dielétrico se a $\tan \delta \ll 1$, ou um bom condutor se a $\tan \delta \gg 1$ (Sadiku, 2012); (Hayt Jr & Buck, 2013).

$$\tan \delta = \frac{\sigma + \omega\varepsilon''}{\omega\varepsilon'} \quad (13)$$

Em um absorvedor eletromagnético é desejável que a maior parte da onda incidente seja dissipada. A tangente de perda é um parâmetro importante na avaliação de materiais absorvedores. Portanto, os valores estimados da parte imaginária da permissividade e da condutividade são importantes na determinação da absorção. O caso no qual $\sigma \ll \omega\varepsilon''$ também deve ser considerado para frequências de micro-ondas. Desse modo, a equação (13) pode ser simplificada por:

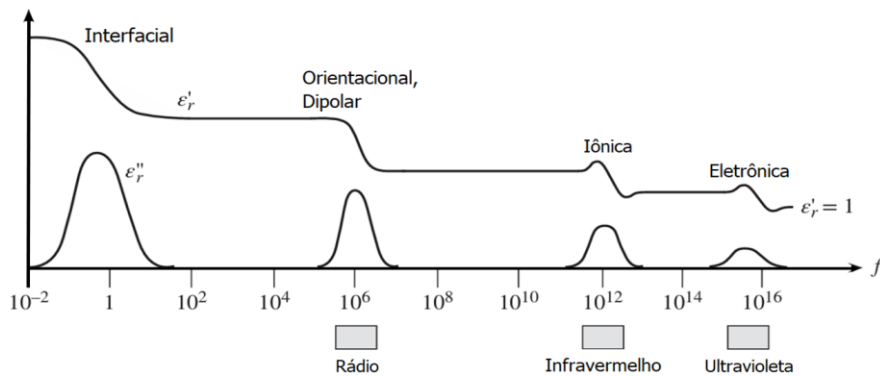
$$\tan \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (14)$$

3.3 Mecanismos de polarização e perdas

A incidência de um campo elétrico externo em um dielétrico, produz um alinhamento de momentos dipolos nas suas estruturas atômicas ou moleculares. Existem três tipos ou fontes de polarização: eletrônica, iônica e de orientação (orientacional ou dipolar). Dependendo do material dielétrico e da maneira como o campo externo é aplicado, pelo menos um desses tipos de polarização está presente (Callister & Rethwisch, 2021). A polarização eletrônica surge do deslocamento da nuvem de cargas eletrônicas em relação ao núcleo positivo, sendo encontrada em todos os materiais dielétricos e existe apenas enquanto um campo elétrico está presente (Callister & Rethwisch, 2021). A polarização iônica ocorre a partir do deslocamento de íons positivos e

negativos em relação às suas posições neutras, dando origem a um momento dipolo resultante (Raju, 2003). A polarização orientacional surge apenas em materiais constituídos por moléculas ou partículas com momento dipolar permanente, no qual suas moléculas polares tendem a se alinhar com o campo elétrico (Kasap, 2018). Alguns autores (Kasap, 2018) (Raju, 2003) incluem ainda na classificação, a polarização interfacial que ocorre quando há um acúmulo de carga em uma interface entre dois materiais ou entre duas regiões de um material devido ao campo elétrico externo. Este tipo de polarização não ocorre apenas em cargas ligadas, mas também em cargas livres (Kasap, 2018). Na Figura 1 são mostradas as permissividades ϵ'_r e ϵ''_r num dielétrico em função das frequências do campo elétrico externo aplicado, e respectivos mecanismos de polarização interfacial, orientacional, iônica e eletrônica.

Figura 1 - Mecanismos de polarização interfacial, orientacional, iônica e eletrônica



Fonte: Adaptado de (Kasap, 2018).

No mecanismo de polarização, considerando certas condições, a oposição dos dipolos ao alinhamento de um campo elétrico externo pode causar perdas num material pelo efeito Joule. Existem dois fatores para estas perdas: o primeiro é a agitação térmica que tenta randomizar as orientações dos dipolos, e segundo, devido à viscosidade do meio, no qual as moléculas não conseguem responder às variações do campo. Se o campo muda muito rápido, os dipolos não podem seguir o alinhamento e, como consequência, permanecem orientados aleatoriamente (Kasap, 2018). O tempo necessário para que as cargas polarizadas voltem às suas condições de equilíbrio, após o campo elétrico decrescer a zero, é denominado de tempo de relaxamento (τ). O processo de excitação dos dipolos, através do campo elétrico com frequência ω , e respectiva

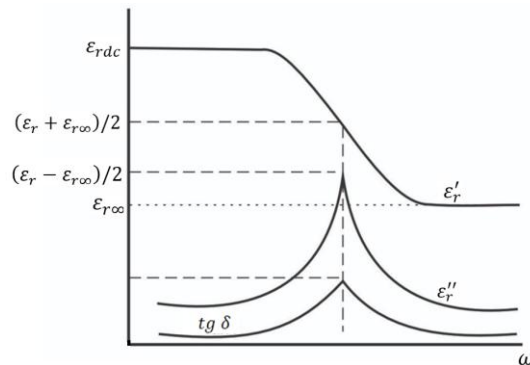
resposta dada pelo seu relaxamento τ , apresenta um comportamento ressonante que pode ser explicado pela Figura 2 e equações de Debye (15) e (16) (Kasap, 2018), conforme a seguir:

$$\varepsilon_r' = \varepsilon_{r\infty} + \frac{\varepsilon_{rdc} - \varepsilon_{r\infty}}{1 + (\omega\tau)^2}, \quad (15)$$

$$\varepsilon_r'' = \frac{(\varepsilon_{rdc} - \varepsilon_{r\infty})(\omega\tau)}{1 + (\omega\tau)^2}, \quad (16)$$

sendo que o termo ε_{rdc} representa a permissividade para frequências muito baixas próximas de zero, no qual a variação do campo elétrico é desprezível no mecanismo de perdas ($\omega\tau \cong 0$). O termo $\varepsilon_{r\infty}$ representa a permissividade para frequências muito altas ($\omega \gg 1/\tau$), no qual as perdas também são desprezíveis. No entanto, existe um ponto de maior perda, denominado de pico de perda de Debye em $\omega = 1/\tau$, onde $\varepsilon_r'' = (\varepsilon_{rdc} - \varepsilon_{r\infty})/2$ (Kasap, 2018).

Figura 2 - Esquema representativo do mecanismo de perda na polarização



Fonte: Adaptado de Raju (2003).

Analisando os gráficos das Figuras 1 e 2 é possível observar que:

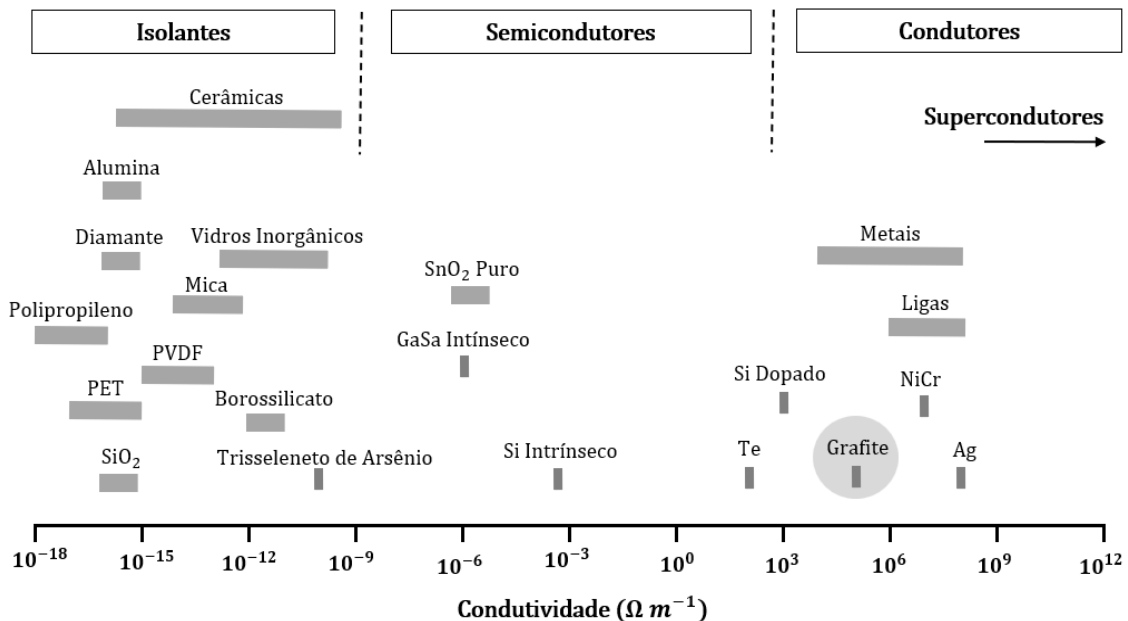
- as perdas por polarização (interfacial, orientacional, iônica e eletrônica) apresentam um comportamento ressonante, dado pela frequência de excitação do campo externo ω e respectiva resposta na frequência de relaxamento $1/\tau$;
- para frequências abaixo da ressonância, a polarização e o relaxamento dos dipolos acompanham as frequências do campo externo, por isso, ε_r' é constante e ε_r'' nulo;
- contudo, à medida que a frequência vai se aproximando da ressonância, o tempo de relaxamento vai se tornando menor que a polarização, nesse caso, ε_r' começa a cair e ε_r'' a crescer, alcançando um valor máximo na ressonância;

- d) para frequências acima da ressonância, a variação do campo externo é tão alta, comparada ao tempo de polarização, que o relaxamento praticamente não acontece, e então, ε_r' torna-se novamente constante e ε_r'' nulo;
- e) um material pode apresentar um pico de ε_r'' particular para cada mecanismo de polarização presente;
- f) a permissividade ε_r'' depende do tipo de polarização no material e da frequência aplicada;
- g) através dos gráficos de ε_r' e ε_r'' de um determinado material é possível estimar a sua tangente de perda para uma dada frequência.

3.4 Efeito da condutividade na tangente de perdas

Embora não haja uma fronteira nítida, é possível classificar empiricamente vários materiais sólidos em condutores, semicondutores e isolantes, de acordo com os seus valores de condutividade (Kasap, 2018), como visualizado na Figura 3. Os condutores são identificados pelos metais, no entanto, outros materiais não metálicos podem ser enquadrados nessa categoria. Um exemplo é o grafite que é formado por ligações covalentes de carbono e tem condutividade na ordem de $10^5 \Omega^{-1}.m^{-1}$ (Kasap, 2018) , destacado na Figura 3, ou resistividade de $10^{-5} \Omega.m$ (Callister & Rethwisch, 2021).

Figura 3 - Faixa de condutividades de alguns materiais



Fonte: Adaptado de Kasap (2018).

De acordo com a teoria da propagação das ondas eletromagnéticas, quando uma onda incide em uma superfície condutora ideal, ocorre reflexão total da onda incidente, e quando a mesma onda incide em uma superfície isolante, o sinal atravessa o material sem sofrer perdas. No caso do absorvedor classificado como resistivo, para que ocorra redução das potências das ondas refletidas e transmitidas, a condutividade na sua superfície deve ser suficiente para gerar perdas pelo efeito Joule, mas também deve ser limitada para não funcionar com uma superfície puramente condutora e produzir grandes potências refletidas.

3.4.1 Condutividade CC e CA em meio com perdas

Quando uma onda eletromagnética que se propaga pelo ar incide em um meio não magnético, mas com perdas resistivas e dielétricas, a dissipação da potência dessa onda é causada pelas propriedades de condutividade e permissividade do meio, conforme equação (6), que pode ser apresentada pela equação (17) (Pozar, 2012).

$$\nabla \times \mathbf{H}_s = j\omega \left(\varepsilon' - j\varepsilon'' - \frac{\sigma}{\omega} \right) \mathbf{E}_s \quad (17)$$

A condutividade CC no material corresponde ao caminho ou rede de percolação que permite aos elétrons livres ou íons se deslocarem como resposta à incidência da onda eletromagnética no meio. Essa condutividade não varia com a frequência da onda, e as perdas produzidas estão relacionadas à dissipação pelo efeito ôhmico. A condutividade CA, no mesmo meio material, corresponde às cargas elétricas ligadas (dipolares) que se reorientam e oscilam como resposta às variações do sinal eletromagnético incidente. Sua condutividade varia diretamente com a frequência da onda, e as perdas produzidas são proporcionais à permissividade imaginária do material. Ou seja, essa parcela da condutividade CA nada mais é do que o produto da frequência angular pela permissividade imaginária associada aos mecanismos de polarização (Gumus, 2023). A equação (18) expressa a condutividade efetiva em função das condutividades.

$$\sigma_{ef} = \sigma_{DC} + \sigma_{AC_polarização} \quad (18)$$

Quando se analisam as perdas causadas pela condutividade no absorvedor, o termo σ_{AC} é a própria perda dielétrica no meio (Pozar, 2012). Portanto, as equações (8) e (18) expressam as

mesmas coisas, apenas definidas de modos diferentes.

3.5 Absorvedores eletromagnéticos

Os absorvedores são instalados em ambientes para proteger equipamentos da interferência de ondas eletromagnéticas incidentes. No desenvolvimento do projeto de um absorvedor devem ser consideradas, a faixa de frequências de operação, o nível de atenuação requerida, as condições do local e as dimensões da área protegida. Segundo Kotsuka (2019), os absorvedores de ondas eletromagnéticas (EM) são classificados com base na sua estrutura, no material empregado e na sua largura de banda de operação. Na Tabela 3 pode ser observada a classificação dos absorvedores eletromagnéticos de acordo com sua composição, forma e faixa de operação.

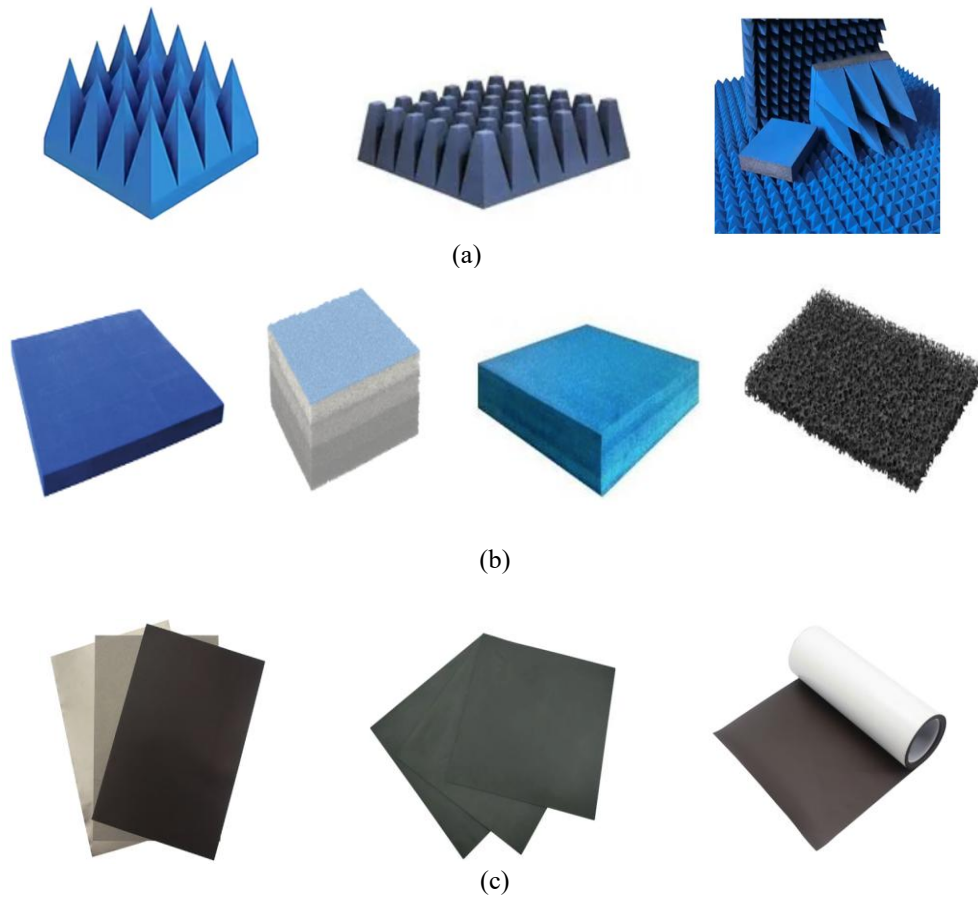
Tabela 3 - Classificação dos absorvedores eletromagnéticos

Quanto ao tipo de material empregado	Condutor ou Resistivo	Materiais de carbono, p. ex. negro de fumo ou grafite. Materiais à base de metal, com certa resistência.
	Dielétrico	Borracha de carbono, uretano espumado contendo carbono e espumas de poliestireno contendo carbono
	Magnético	Ferrite ou material de ferro carbonílico
	Outros	Metamateriais e materiais especiais
Quanto ao número de camadas	Única camada	Feito de uma única camada
	Duas Camadas	Consiste em duas camadas de diferentes materiais
	Multicamadas	Possui três ou mais camadas de materiais combinados
Quanto à forma do absorvedor	Em forma de placa	Configuração simples de placa plana única.
	Absorvedor de $\lambda/4$ de onda	Um filme resistivo é colocado a uma distância de $\lambda/4$ de onda de uma placa condutora.
	Multicamadas	Várias camadas planas de diferentes materiais.
	Jaumann	Folhas resistivas e placas dielétricas colocadas de modos alternados
	Chevron	Estrutura montada no formato Chevron no lado incidente.
Quanto a faixa de frequência de operação do absorvedor	Piramidal	Estrutura piramidal cônica no lado incidente.
	Banda estreita	$10\% < \frac{\Delta f}{f_0} < 20\%$
	Banda larga	$20\% < \frac{\Delta f}{f_0} < 30\%$
	Banda ultralarga	$\frac{\Delta f}{f_0} > 30\%$

Fonte: Kotsuka (2019).

Na Figura 4 são apresentados alguns modelos comerciais de absorvedores. As características mais relevantes a serem consideradas no projeto e na fabricação de um absorvedor eletromagnético são: alta eficiência e ampla faixa de absorção, baixo custo, espessura reduzida, simplicidade de fabricação, baixo peso, reduzida densidade, resistência às intempéries e boa durabilidade (Elmahaishi, 2022).

Figura 4 - Exemplos de absorvedores comerciais: a) piramidais; b) espumas; c) películas flexíveis

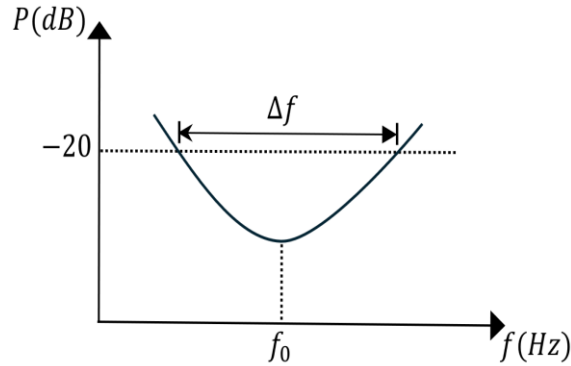


Fonte: Autoria própria (2024).

Na Tabela 3, $\Delta f/f_0$ é a relação entre a largura da banda da faixa atenuada e a frequência de maior atenuação no intervalo (Figura 5). Uma atenuação da potência incidente de -20 dB pelo absorvedor é aceita amplamente como padrão de eficiência (Kotsuka, 2019) (Duan & Guan, 2017), correspondendo a 99% de absorção da energia da onda eletromagnética. No entanto, uma atenuação

de -10 dB já é considerada satisfatória em muitos casos, visto que representa a absorção de 90% da energia incidente.

Figura 5 - Largura de banda do absorvedor



Fonte: Autoria própria (2024).

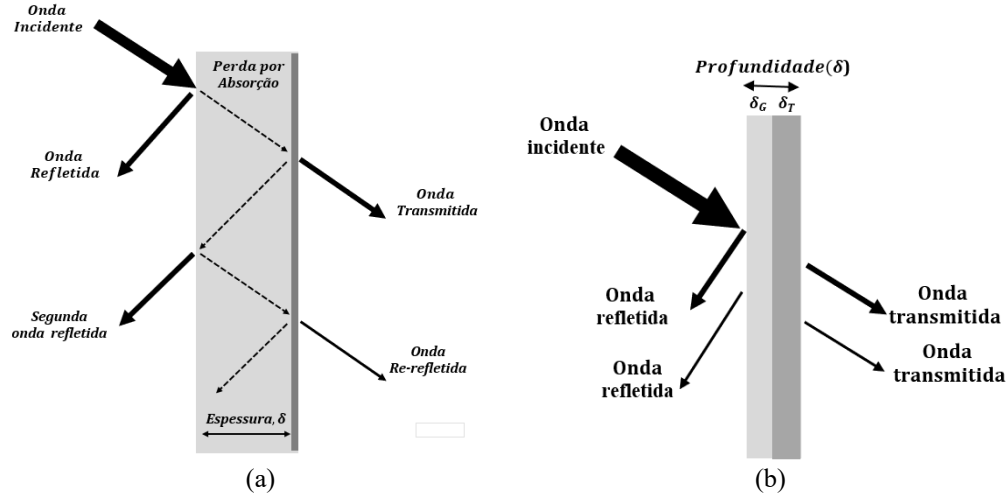
3.6 Princípio da absorção eletromagnética

O mecanismo de absorção do absorvedor pode ser explicado pela teoria de propagação, na qual as ondas eletromagnéticas são dissipadas dentro do material por meio de um ou mais caminhos, como perdas elétricas, magnéticas, dielétricas e por polarização (Wang L. e., 2023). De acordo com Elmahaishi (2022), quando uma onda eletromagnética incide sobre um absorvedor, a maior parte da potência deve ser absorvida pelo material, minimizando as ondas refletidas no meio. No absorvedor proposto por Elmahaishi (2022), ilustrado na Figura 6a, a absorção resulta da perda de potência pelo efeito Joule na superfície ou nas múltiplas reflexões internas do absorvedor, devido à interação das ondas eletromagnéticas incidentes com as cargas livres e polarizadas do material. Dependendo da aplicação do absorvedor, uma placa condutora pode ser introduzida na extremidade do material para reduzir a potência da onda transmitida e aumentar as interações das ondas refletidas na parte interna do absorvedor. O absorvedor com placa condutora é denominado de tela de Salisbury. A tela de Salisbury é um absorvedor passivo de micro-ondas que é construído colocando-se uma única folha resistiva fina a uma distância de $1/4$ de onda acima de um plano de aterramento perfeitamente condutor que gera ondas refletidas e destrutivas (Marra, 2018).

Na Figura 6b é ilustrado o absorvedor têxtil desenvolvido nesta Tese, com a indicação da espessura δ_G do compósito de grafite/PVA, depositado sobre o substrato de tecido *denim* de espessura δ_T . O objetivo deste trabalho é aumentar a eficiência da absorção eletromagnética, com a redução do custo de produção, utilizando um absorvedor de baixo custo, leve, flexível e fino. O compósito de espessura δ_G é resistivo, com tangente de perda definida pela equação (13), no qual

o material de grafite e PVA contribuem com perdas por condutividade e polarização. É importante observar que o absorvedor desenvolvido não possui placa condutora, pois são requisitos fundamentais deste Tese, apresentar uma solução com eficiência de absorção, mas que o material seja leve e fino.

Figura 6 - Princípio de absorção eletromagnética: a) absorvedor genérico; b) absorvedor têxtil



Fonte: Adaptado de Elmahaishi (2022).

3.7 Casamento de impedância do absorvedor

Os parâmetros elétricos $\varepsilon(\varepsilon', \varepsilon'')$ e magnéticos $\mu(\mu', \mu'')$ são fundamentais no projeto dos absorvedores eletromagnéticos, visto que a eficiência na absorção do material está relacionada diretamente as componentes imaginárias desses parâmetros (ε'' e μ''). As magnitudes da permissividade e permeabilidade implicam em uma correspondência de impedância característica no meio material. Portanto, valores adequados de ε e μ devem ser levados em consideração na escolha do material. É importante encontrar um equilíbrio entre a correspondência de impedância característica e a absorção da onda (Duan & Guan, 2017).

Um dos fatores importantes no desenvolvimento de absorvedores é a estimativa da impedância de entrada (Z_{in}) do meio material e subsequente casamento com o espaço livre ($Z_0 = 377 \Omega$). Quando a onda incide perpendicularmente à superfície do absorvedor, a perda de reflexão R_L , expressa em decibéis (dB) pela equação (19), define quantitativamente eficiência do absorvedor. Caso a Impedância de entrada Z_{in} seja muito baixa, ou próxima de zero, o absorvedor se comportará como um metal e a perda por reflexão será mínima, o que significa que

a reflexão será máxima. Se a impedância de entrada for próxima de Z_0 , a onda penetrará no meio material, permitindo que a energia seja dissipada por meio dos mecanismos de perdas internos.

$$R_L = 20 \log \left[\frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \right]. \quad (19)$$

A estimativa analítica da impedância característica do material absorvedor é fundamentada na teoria das linhas de transmissão. Uma onda eletromagnética que se propaga pelo espaço livre ao incidir numa superfície de um meio, com ou sem perdas, sofrerá a influência da impedância de entrada definida na equação (20). A impedância Z_{in} depende da impedância intrínseca do material absorvedor $\eta_m (\mu, \varepsilon)$, da constante de propagação $\gamma = \alpha + j\beta$, dos parâmetros de espessura interna do meio d e da terminação de carga do absorvedor Z_L :

$$Z_{in}(d) = \eta_m \frac{Z_L + \eta_m \tanh(\gamma d)}{\eta_m + Z_L \tanh(\gamma d)}. \quad (20)$$

Em diversos trabalhos são desenvolvidos absorvedores de tela de Salisbury, no qual uma placa condutora é colocada atrás do meio material absorvedor, tornando a terminação de carga $Z_L = 0$ (Figura 6a), (Duan & Guan, 2017), (Basket, 2017), (Mishra, 2017), (Liu, 2018), (Ismail, 2019), (Perez, 2022). A equação da impedância de entrada Z_{in} na interface ar-material no absorvedor de camada única, tela de Salisbury, tendo do lado frontal o ar e apoiado na parte posterior por um condutor perfeito é definida nas equações (21) e (22) (Duan & Guan, 2017). Essa solução absorvedora é muito eficiente, pois as ondas transmitidas que atravessam o material casado com o espaço livre, são refletidas pela placa condutora, gerando ondas destrutivas.

$$Z_{in}(d) = \eta_m \tanh(\gamma d), \quad (21)$$

substituindo na equação (21), $\eta_m (\mu, \varepsilon, \sigma)$ e $\gamma (\omega, \mu, \varepsilon, \sigma)$ é obtido:

$$Z_{in}(d) = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \tanh \left(j \frac{2\pi}{\lambda} d \sqrt{\mu \varepsilon} \right). \quad (22)$$

Na equação (23) a impedância de entrada na forma geral é modificada substituindo a permeabilidade e permissividade complexa do material μ_r e ε_r , sendo $\mathbf{Z}_0 = \sqrt{\omega_o/\varepsilon_o}$, f a frequência da onda, c é a velocidade da luz, d a espessura do material absorvedor:

$$\mathbf{Z}_{in}(d) = \mathbf{Z}_0 \sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}} \tanh \left(j \frac{2\pi f}{c} d \sqrt{\mu_r \varepsilon_r} \right). \quad (23)$$

Diferente da solução absorvedora de tela de Salisbury, o absorvedor desenvolvido nesta Tese tem camada única, e o tecido não está apoiado em outro material. Portanto, para efeito de estimativa da impedância de entrada, deve ser considerado $\mathbf{Z}_L = \mathbf{Z}_0$ e a equação (20) torna-se, com as devidas substituições:

$$\mathbf{Z}_{in}(d) = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \left[\frac{\mathbf{Z}_0 + \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \tanh \left(j \frac{2\pi}{\lambda} d \sqrt{\mu \varepsilon} \right)}{\sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} + \mathbf{Z}_0 \tanh \left(j \frac{2\pi}{\lambda} d \sqrt{\mu \varepsilon} \right)} \right]. \quad (24)$$

A equação (24), aplicada ao absorvedor têxtil de grafite/PVA, considera que:

- a) o material produzido é não magnético, logo $\mu_r = 1$, o que implica em $\mu = j\omega\mu_0$;
- b) o material tem permissividade $\varepsilon = j\omega\varepsilon_0\varepsilon_r$, com $\varepsilon_r = \varepsilon'_r + j(\varepsilon''_r + \sigma/\omega\varepsilon_0)$.

É importante observar as notações empregadas na prática, pois os equipamentos de medição não fazem distinção entre as perdas por polarização e por condutividade. Desse modo, considera-se para efeito prático que ε''_r expressa as perdas tanto dielétricas, quanto da condutividade (Keysight, 2020), assim, o termo imaginário $(\varepsilon''_{rd} + \sigma/\omega\varepsilon_0)$ é simplificado em:

$$\varepsilon''_r = \varepsilon''_{rd} + \frac{\sigma}{\omega\varepsilon_0}. \quad (25)$$

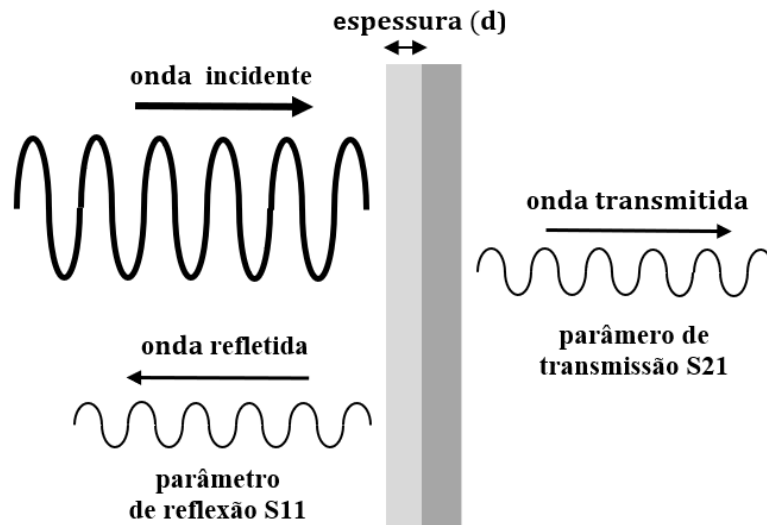
No desenvolvimento do absorvedor têxtil, o equilíbrio da mistura grafite/PVA e a espessura do material são parâmetros sensíveis que impactam na impedância $\mathbf{Z}_{in}$ do material e na sua eficiência de absorção. A escolha da proporção de grafite e PVA é fundamental, pois uma quantidade grande de grafite na mistura pode tornar o absorvedor muito condutivo, produzindo ondas refletidas acima do desejado. Da mesma forma, quantidades baixas de grafite, pode tornar o

PVA predominante e, por ser um composto isolante, embora reduza as reflexões, pode diminuir as perdas internas, gerando ondas transmitidas sem a atenuação desejada.

A espessura (d) do absorvedor é outro ponto que precisa ser avaliada, mesmo se existir um bom casamento de impedância, pois quanto mais fino for o material, menor será o tempo e a distância de propagação das ondas internas expostas às perdas. Portanto, o casamento de impedância da interface do ar com material absorvedor, permite apenas que a onda penetre no material, mas não garante sua atenuação.

Na Figura 7 é apresentada uma ilustração do absorvedor do absorvedor têxtil produzido com espessura d . Deve ser observado que o objetivo do absorvedor é reduzir as potências refletidas e transmitidas, comprovadas a partir das medições dos parâmetros S_{11} e S_{21} na caracterização eletromagnética.

Figura 7 - Ondas incidentes e resultantes no absorvedor



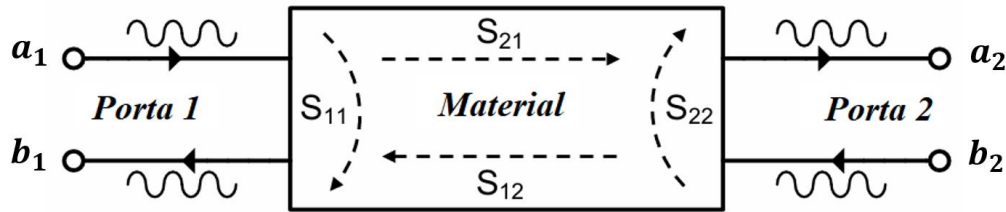
Fonte: Autoria própria (2026).

3.8 Analisador de rede vetorial

Um analisador de rede vetorial — VNA (*Vector Network Analyzer*) é um instrumento de medição de alta precisão utilizado em testes de sistemas de radiofrequência e micro-ondas. Em ensaios eletromagnéticos voltados à determinação dos níveis de absorção de um meio material, o VNA quantifica a interação das ondas que incidem, refletem e são transmitidas através da amostra. Diferente de um analisador escalar que se limita a medir a amplitude do sinal, o VNA mede simultaneamente a magnitude e a fase das ondas eletromagnéticas.

O diagrama de blocos na Figura 8 representa a interação das ondas eletromagnéticas geradas por duas portas de um VNA e o meio material absorvedor que responde às ondas injetadas pelo equipamento. Essa interação resulta no espalhamento dos sinais, o qual é quantificado pelos chamados parâmetros de espalhamento ou parâmetros S (do inglês *Scattering*). O funcionamento do sistema baseia-se em sinais de tensões complexas que entram e saem pelas portas 1 e 2 do VNA, nos quais a_1 e a_2 representam, respectivamente, os sinais injetados pelas portas 1 e 2 do equipamento, em direção ao meio, e b_1 e b_2 representam os sinais que entram pelas portas 1 e 2, como resposta do meio.

Figura 8 – Representação das portas do VNA e material absorvedor



Fonte: Adaptado de (Daniel, 2019).

A partir das medições dos sinais complexos a_1 , a_2 , b_1 e b_2 , os parâmetros de espalhamento S do sistema são determinados, sendo S_{11} e S_{22} parâmetros de reflexão, e S_{12} e S_{21} de transmissão (National Instruments, s. d.) (Daniel, 2019).

Os parâmetros de reflexão correspondem aos níveis refletidos pelo sistema e que retornam às portas de origem, sendo que:

- a) S_{11} : é a razão entre o sinal refletido que volta pela porta 1 (b_1) e o sinal que foi injetado pela mesma porta 1 (a_1). No contexto dos absorvedores eletromagnéticos, um valor baixo de S_{11} indica que a onda penetrou na estrutura da amostra, sofrendo pouca reflexão:

$$S_{11} = \frac{b_1}{a_1} \Big|_{a_2=0} \quad (26)$$

- b) S_{22} : É o equivalente para o lado oposto, representando a razão entre o sinal que retorna pela porta 2 (b_2) e o sinal incidente injetado pela mesma porta (a_2):

$$S_{22} = \frac{b_2}{a_2} \big|_{a_1=0} \quad (27)$$

Os parâmetros de transmissão medem a fração do sinal que atravessa o meio e alcança a porta oposta:

- a) S_{21} : é razão entre o sinal recebido na porta 2 (b_2) e o sinal que foi injetado pela porta 1 (a_1). Na avaliação dos absorvedores eletromagnéticos, um valor baixo de S_{21} indica que a onda sofreu uma atenuação ao se propagar pelo interior do material:

$$S_{21} = \frac{b_2}{a_1} \big|_{a_2=0} \quad (28)$$

- b) S_{12} : é o equivalente para o lado oposto, ou seja, é a relação entre o sinal que atravessa o meio e alcança a porta 1 (b_1) e o sinal que foi injetado pela porta 2 (a_2):

$$S_{12} = \frac{b_1}{a_2} \big|_{a_1=0} . \quad (29)$$

Os parâmetros de espalhamento S definidos anteriormente são grandezas adimensionais complexas. Para correlacioná-los com o balanço de potência do sistema, a magnitude desses parâmetros deve ser associada às potências de refletância (R) e transmitância (T), conforme as equações (30) e (31) (Daniel, 2019):

$$R = |S_{11}|^2 \quad \text{ou} \quad R = |S_{22}|^2 , \quad (30)$$

$$T = |S_{21}|^2 \quad \text{ou} \quad T = |S_{12}|^2 . \quad (31)$$

A eficiência da blindagem eletromagnética de um material pode ser expressa pelos termos SE_R e SE_T , conforme equações (32) e (33) (Ghosh K. S., 2021). De acordo com essas equações, quanto menores a refletância e a transmitância, maior a eficiência de blindagem do material.

$$SE_R = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{1 - R} \right) \quad (32)$$

$$SE_T = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{T} \right) \quad (33)$$

Enquanto a blindagem de um material tem como objetivo principal bloquear a passagem de ondas eletromagnéticas, principalmente por reflexão, um material absorvedor visa mitigar a energia da onda por dissipação interna. A avaliação do desempenho de absorvedores é convencionalmente realizada em escala logarítmica (dB) diretamente sobre a magnitude dos coeficientes de reflexão (S_{11} ou S_{22}) e transmissão (S_{21} ou S_{12}), expressos por:

$$S_{11}(dB) = 20 \log_{10}|S_{11}| \quad \text{ou} \quad S_{22}(dB) = 20 \log_{10}|S_{22}| , \quad (34)$$

$$S_{21}(dB) = 20 \log_{10}|S_{21}| \quad \text{ou} \quad S_{12}(dB) = 20 \log_{10}|S_{12}| . \quad (35)$$

Observa-se que os parâmetros S em dB das equações (34) e (35) representam a atenuação sofrida pelas ondas eletromagnéticas em relação ao sinal incidente. Como os módulos estão contidos no intervalo $0 < |S_{mn}| \leq 1$, os valores correspondentes em escala logarítmica resultam sempre em grandezas negativas ou nulas ($S_{mn} \text{ (dB)} \leq 0 \text{ dB}$). Dessa forma, quanto menor (mais negativo) for o valor do parâmetro S em dB, menor será a parcela da onda refletida ou transmitida, indicando maior eficiência de atenuação e absorção do meio material.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O material absorvedor desenvolvido neste trabalho é um compósito de grafite natural em pó, disperso em uma matriz PVA e aplicado sobre um substrato *denim* (popularmente conhecido como jeans). De acordo com a classificação, o absorvedor produzido é denominado de resistivo, pois utiliza as características elétricas de condutividade e permissividade no processo de absorção das ondas eletromagnéticas incidentes. O critério para a escolha do compósito absorvedor se baseia na tangente de perdas dos seus compostos. De acordo com a equação (6) um bom absorvedor resistivo deve possuir uma alta tangente de perda, sendo que as grandezas σ e ε'' , combinadas ou não, devem ser avaliadas para se alcançar uma boa absorção.

O material principal no desenvolvimento da Tese é o grafite em pó na sua forma natural. Sua escolha deve-se à boa condutividade, disponibilidade comercial e baixo custo. O segundo componente empregado é o PVA, que atua como matriz dispersante do grafite na produção de uma mistura ligante. O terceiro elemento escolhido é o substrato no qual a mistura será depositada. Para isso, foi escolhido um material flexível comercial têxtil do tipo *denim*, caracterizado por seu baixíssimo custo e viabilidade de aplicação.

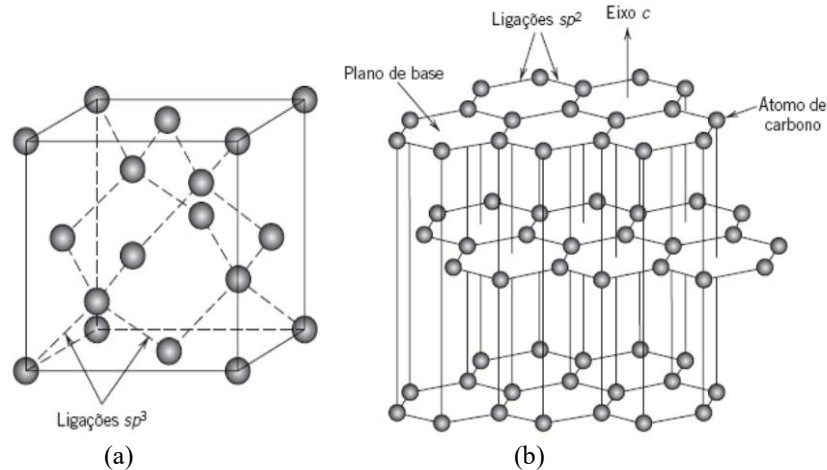
4.1 Grafite

Existem vários alótropos do carbono, dos quais os mais difundidos são o grafite, o diamante e carbono amorfo (Gupta, 2018). Materiais à base de carbono não se enquadram, na realidade, em qualquer um dos esquemas de classificação tradicionais para metais, cerâmicas e polímeros (Callister & Rethwisch, 2021). O grafite é uma forma pura de carbono, sendo considerado o melhor condutor térmico e elétrico entre os não metais. É um mineral macio, flexível, refratário e quimicamente inerte, e é usado em diversas aplicações industriais (Grafite, 2020).

O termo grafite ou grafita é originário do grego *graphein* que significa "escrever" (Pieson, 1995). O grafite é usado para escrever desde o início da história e os primeiros lápis foram fabricados na Inglaterra no século XV (Pieson, 1995). O grafite natural é proveniente de depósitos de matérias orgânicas, presentes na natureza em jazidas na forma semelhante ao carvão, com idade estimada em pelo menos 10^9 anos, sendo utilizado no período romano na selagem de jarros de barro para armazenar vinho e na fabricação de cerâmicas ignífugas. Na Idade Média, foi utilizado para fabricar cadinhos e graxa, e em 1772, o químico francês Antoine de Lavoisier identificou, através de sua experiência de combustão, que o grafite e o diamante são modificações de carbono

puro (Jaroszewski, Thomas, & Rane, 2021). Na Figura 9 são apresentadas as estruturas do diamante e do grafite, com as diferenças das disposições tetraédricas dos dois alotrópicos.

Figura 9 - Estruturas alotrópicas do carbono: (a) diamante; (b) grafite



Fonte: Adaptado de Callister (2021).

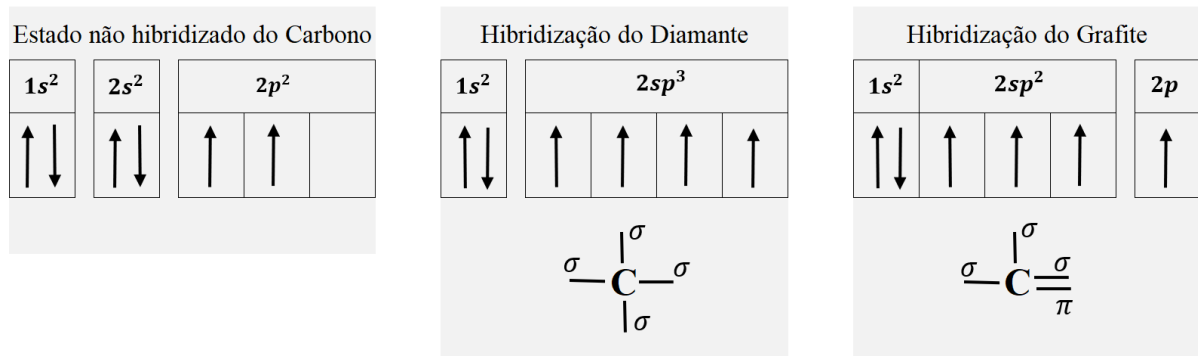
O diamante possui uma rede cristalina em três dimensões em uma forma tetraédrica, com ligações covalentes, hibridização sp^3 e quatro ligações sigma (σ). Isso explica a sua alta dureza e alta condutividade térmica. Os elétrons que participam destas ligações σ estão fortemente presos, o que resulta na ausência de elétrons livres, por isso, o diamante é um ótimo isolante elétrico cuja resistividade é na ordem de $10^{11} \Omega.m$ a $10^{14} \Omega.m$. O grafite, no entanto, é uma substância anisotrópica (Jaroszewski, Thomas, & Rane, 2021), o que implica que suas propriedades dependem da direção cristalográfica sujeitas à medição. Seus átomos de carbono têm hibridização sp^2 , cujo comportamento químico é um pouco diferente da sp^3 .

Na hibridização, o arranjo dos elétrons da camada é modificado quando um dos elétrons do orbital $2s$ é promovido e combinado com dois dos orbitais $2p$ formando três orbitais sp^2 e um elétron no orbital p livre não hibridizado, conforme mostrado na Figura 8. A configuração sp^2 somado ao p , gera três ligações fortes σ e uma ligação fraca π . Conforme a Figura 8b, na estrutura do grafite os átomos de carbono estão localizados nos vértices dos hexágonos dispostos em planos de base, camadas ou “lâminas” regulares. Assim, nos planos, cada carbono possui quatro ligações: três σ (fortes), ligados a outros três carbonos, e uma ligação π (fraca), ligado a um dos três carbonos anteriores. Além disso, os planos estão interligados de maneira muito fraca por forças de Van der Waals, apresentadas por linhas verticais da Figura 8b. Esta característica estrutural permite que um

plano possa deslizar sobre outro, o que dá ao grafite o aspecto macio e quebradiço, sendo, portanto, utilizado em sapatas de freio, pó lubrificantes, eletrodos de solda, escovas de motores e lápis.

O grafite é um bom condutor de eletricidade devido às suas características de hibridização explicadas, o que implica em uma resistividade elétrica muito baixa, na ordem de $10^{-5} \Omega.m$ no plano e $10^{-2} \Omega.m$ entre os planos (Callister & Rethwisch, 2021). A condutividade elétrica do grafite é explicada pelo fato de que com a hibridização sp^2 , sobra um elétron no orbital p que não participa desta hibridização. Esse elétron forma uma ligação π com outro átomo de carbono, no plano, produzindo assim duas ligações entre si, uma σ formada pelos orbitais sp^2 e uma π formada pelos orbitais p . Os elétrons envolvidos na ligação π podem se movimentar em uma nuvem eletrônica sobre cada plano do grafite, mas não há deslocamento de elétrons entre os planos (Pieson, 1995). Os elétrons livres são móveis, e seu movimento em resposta à presença de um campo elétrico que esteja sendo aplicado em uma direção paralela ao plano é responsável pela resistência baixa, isto é, alta condutividade. Na Figura 10 são representadas as hibridizações do diamante e do grafite.

Figura 10 - Hibridização de orbitais dos carbonos do diamante e do grafite



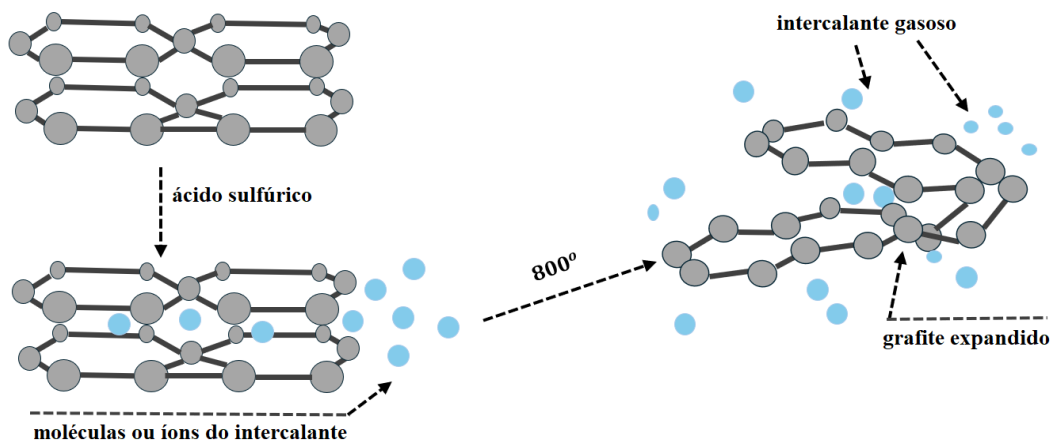
Fonte: Autoria própria, 2024.

A estrutura do grafite corresponde a uma configuração de planos ou lâminas interligados. Contudo, uma única camada de grafite, quando separada da sua estrutura original, gera um material denominado de grafeno. Diversos trabalhos se referem aos planos paralelos do grafite como grafeno. Quando uma camada do grafeno é separada do grafite, a lâmina dá origem a um material altamente resistente devido às suas fortes ligações sp^2 , e se a lâmina for enrolada na forma de tubo, sua resistência aumenta ainda mais. Um grafeno enrolado na forma de tubo é denominado de nanotubo de carbono.

O grafite natural é descrito como um mineral encontrado na natureza. No entanto, além da sua forma natural, ele pode sofrer variações a partir de processos físicos e químicos, podendo ser apresentado de outras três maneiras: intercalado, expandido e nanométrico (Knuth, 2022).

O grafite intercalado provém do grafite natural, tendo como característica a presença de intercalantes entre suas camadas (Knuth, 2022). A intercalação é gerada pela inserção e dispersão de átomos ou moleculares de diferentes espécies químicas entre as camadas (Senguptaa, 2011). Entre os processos, o mais utilizado é através do choque térmico do grafite intercalado à temperatura na faixa de 600 °C a 1000 °C, no qual o grafite se expande na direção perpendicular ao plano (Senguptaa, 2011). O grafite na forma nanométrica, também denominada de nanofolhas, corresponde ao grafite expandido, cujas lâminas são separadas alcançando dimensões nanométricas. As separações das camadas são obtidas a partir das quebras das forças fracas de Van der Waals presentes no grafite expandido, por meio de algum processo de esfoliação (Knuth, 2022). A Figura 11 ilustra o processo de obtenção do grafite expandido, a partir dos grafites natural e intercalado.

Figura 11 - Ilustração da obtenção do grafite expandido



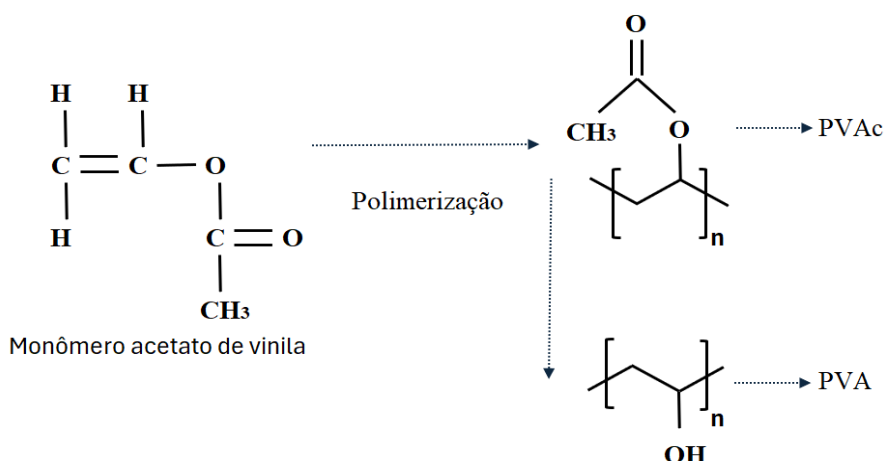
Fonte: Adaptado de Wissler (2006).

4.2 Poli (álcool vinílico) (PVA)

Os polímeros são divididos, a partir da sua estrutura química, em polímeros de cadeia carbônica e polímeros de cadeia heterogênea. O poli (álcool vinílico) – PVA é um polímero de cadeia carbônica pertencente à classe polivinil ésteres, sendo muito utilizado na forma de emulsão aquosa para a confecção de tintas (Canevarolo Jr, 2006).

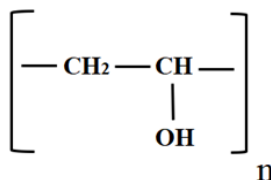
O processo de obtenção do polímero PVA envolve etapas específicas, começando com o monômero acetato de vinila, que é instável para uma polimerização direta (Ebewe, 1996). O primeiro passo é a polimerização do acetato de vinila, um monômero à base de éster vinílico, que gera o poli(acetato de vinila) (PVAc). Então, é necessário realizar uma reação de hidrólise, na qual os grupos acetato do PVAc são convertidos em grupos hidroxila, resultando na formação do álcool vinílico. No entanto, a reação de hidrólise pode ser interrompida em diferentes estágios, o que permite a obtenção de um polímero com variados graus de hidrólise. Na Figura 12 é mostrado o esquema dessa reação. Na prática, o PVA é um copolímero contendo tanto unidades de álcool vinílico quanto de acetato de vinila, variando em proporção conforme o grau de hidrólise alcançado (Patachia, 2009). O PVA é uma resina sintética, solúvel em água e hidrofílico, cuja fórmula molecular é dada por $(C_2H_4O)_n$, conforme Figura 13.

Figura 12 - Esquema da reação da hidrólise do PVAc para produzir PVA



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 13 - Estrutura da molécula do PVA



Fonte: Autoria própria (2024).

Algumas características devem ser levadas em consideração ao solubilizar o PVA, tais como: concentração da solução, massa molecular do polímero e viscosidade. Em geral, todas estão

correlacionadas entre si, isto é, soluções de polímeros de massa molecular alta, têm tendência a proporcionar uma melhor viscosidade.

O PVA é um polímero isolante, diferente de outros polímeros condutores. Segundo Aswathi (2019), os polímeros podem ser classificados em isolantes e condutores. Na categoria dos polímeros isolantes, além do PVA, destacam-se o poliestireno, poli(fluoreto de vinilideno), polipropileno, poli(metacrilato de metila), polietileno, poli(vinilpirrolidona) e epóxi. Os polímeros condutores são aqueles que atingem propriedades eletrônicas quando dopados, porém, sua síntese, custo e disponibilidade ainda tornam o seu uso restrito comercialmente. São exemplos dessa classe: polianilina, o polipirrol e o poli(3,4-etilenodioxitiofeno) (Aswathi, 2019).

O PVA apresenta outras propriedades interessantes, como resistência mecânica, super hidrofílico, características adesivas e baixa toxicidade. Devido a essas propriedades funcionais, o polímero possui diversas aplicações industriais e comerciais, sendo utilizado como espessante em sistemas de emulsão e suspensão, tendo uma excelente capacidade de ligação com materiais celulósicos, como o papel. Essa propriedade o torna ideal para a indústria de papel e embalagens. O PVA é empregado como agente de colagem e revestimento, conferindo rigidez a uma variedade de produtos. Outras aplicações comuns incluem seu uso como espessante em tintas látex, componente essencial na formulação de colas brancas domésticas e adesivos estruturais, além de atuar em composições ligantes para rótulos e cimentos à base de gesso, como aqueles empregados na instalação de ladrilhos cerâmicos (Patachia, 2009).

4.3 Método de Fabricação do Absorvedor

4.3.1 Materiais utilizados na fabricação do absorvedor

Para a fabricação do absorvedor foram utilizados o pó de grafite da marca ACS Científica, o PVA, com massa molar média de 72.000 g/mol, da Bianquímica Comercial LTDA e o tecido de *denim* obtido em lojas populares de tecidos.

4.3.1.1 Informações técnica do pó de grafite

O trabalho teve início com a busca por um grafite em pó que atendesse aos requisitos de absorção eletromagnética, considerando simultaneamente a proposta de desenvolvimento de um

absorvedor de baixo custo e de fácil produção. Para isso, foi escolhido o grafite natural em pó puro em malha 140 adquirido (Figura 14).

A malha 140 especifica a granulometria do pó de acordo com a norma E11 padronizada pelo *Standard Specification for Woven Wire Test Sieve Cloth and Test Sieves* (ASTM E11). Essa norma apresenta os requisitos técnicos para tamanhos padrão, alternativos e suplementares de tecido de arame trançado, construção de peneiras com tecidos entre 125 mm e 20 μm (Gilson Company, 2026). Embora o grafite em pó com malha 140 seja facilmente encontrado em laboratórios, grafites com grânulos mais finos não são fáceis de encontrar no mercado comercial. Na Tabela 4, a seguir, são apresentadas, de modo resumido, algumas especificações da peneira de malha 140 e de outras quatro malhas, para efeito comparativo, contidas na norma ASTM E11 (ASTM, 2026). A partir da interpretação dos dados da Tabela 4, considera-se que o pó de grafite classificado como malha 140 possui aproximadamente 95% das partículas menores que 106 μm .

Figura 14 – Grafite natural em pó



Fonte: Autoria própria (2025).

Tabela 4 - Resumo simplificado das dimensões nominais da Tabela 4 I da ASTM E11

Malha	Abertura nominal	Diâmetro do fio		
		Mínimo	Médio	Máximo
Nº 100	150 μm	0,100 mm	0,085 mm	0,115 mm
Nº 140	106 μm	0,071 mm	0,060 mm	0,082 mm
Nº 170	90 μm	0,063 mm	0,054 mm	0,072 mm
Nº 200	75 μm	0,050 mm	0,043 mm	0,058 mm
Nº 325	45 μm	0,032 mm	0,027 mm	0,037 mm

Fonte: Autoria própria (2026).

4.3.1.2 Preparação do compósito Grafite/PVA

Para o preparo da matriz do compósito grafite/PVA, foram avaliadas concentrações de 10% e 12% (m/v) de PVA em 100 mL de água destilada, sob agitação constante utilizando agitador mecânico Fisatom modelo 711S (Figura 15a), à temperatura de 80 °C, até a obtenção de uma solução homogênea e transparente, o que corresponde a um tempo de 60 minutos. Em seguida, a solução foi resfriada e armazenada em recipiente parcialmente fechado por 24 horas, visando à remoção de bolhas (Figura 15b). Entre as duas soluções, foi escolhida a concentração de 12%.

Figura 15 - Solubilização do PVA



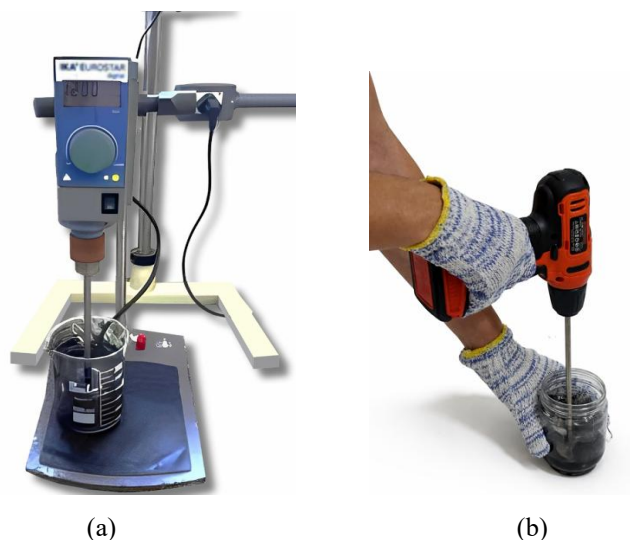
Fonte: Autoria própria (2025).

Posteriormente o grafite em pó natural foi misturado ao PVA sem sofrer tratamento adicional, porém houve o cuidado de se produzir um compósito capaz de ser colado no tecido têxtil, sem comprometer a eficiência da absorção eletromagnética e a flexibilidade do material. No equilíbrio da mistura, a escolha da proporção do pó de grafite no ligante de PVA é um ponto sensível na produção do absorvedor, por isso, foi necessário levar em consideração que uma grande quantidade de grafite torna o material muito condutor, causando aumento da reflexão das ondas incidentes, assim como, baixa quantidade reduz a absorção eletromagnética do absorvedor. Quanto ao PVA, grandes proporções no compósito resultam num material rígido e quebradiço após a secagem. Dessa forma, diferentes frações mássicas de pó de grafite foram avaliadas na matriz

polimérica de PVA, buscando-se um equilíbrio adequado entre absorção eletromagnética, espessura e flexibilidade do material. As proporções que melhor atenderam aos requisitos foram 25% (m/m) de pó de grafite (30 g) à solução de PVA a 12% (m/v).

Na etapa de produção do compósito, dois métodos distintos de mistura do grafite no PVA foram utilizados. Para isso, adicionou-se 25% (m/m) de pó de grafite (30 g) à solução translúcida de PVA a 12% (m/v). Ambas as dispersões foram submetidas à agitação mecânica: a primeira utilizando um agitador mecânico operando a 500 rpm por 30 minutos (Figura 16a), enquanto a segunda foi realizada com uma hélice acoplada a uma parafusadeira, em rotação aproximada de 900 rpm durante 60 segundos (Figura 16b). Os resultados obtidos foram equivalentes.

Figura 16 – Métodos de dispersão do pó de grafite na solução de PVA: (a) equipamento industrial; (b) hélice acoplada a uma parafusadeira

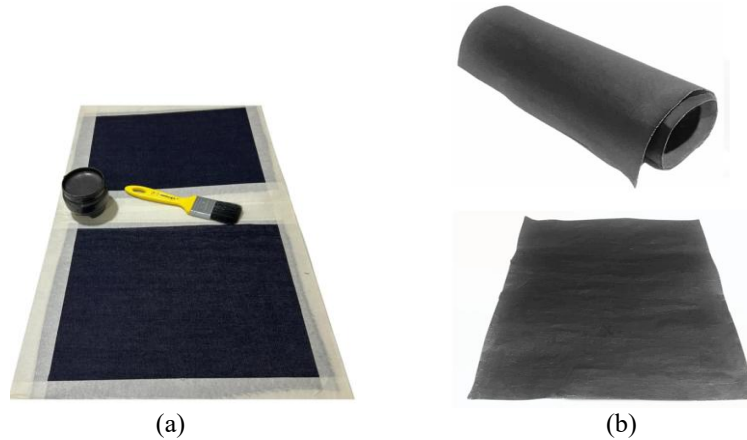


Fonte: Autoria própria (2024).

4.3.2 Preparação do absorvedor

Para o preparo do absorvedor, foi necessário estimar o volume do compósito grafite/PVA a ser depositado sobre a superfície do substrato têxtil (denim). Para essa estimativa, foram utilizadas como referência as dimensões de absorvedores comerciais, correspondentes a 20 x 30 cm (largura x comprimento) de tecido, o qual foi fixado com fita crepe (Figura 17a). Em seguida, um volume de 100 mL do compósito grafite/PVA foi aplicado manualmente com um pincel sobre a superfície do denim. Esse procedimento foi realizado três vezes, com intervalos de 12 horas entre cada aplicação, obtendo-se, ao final, um absorvedor flexível (Figura 17b).

Figura 17 - Preparo do substrato denim para depósito do compósito grafite/PVA



Fonte: Autoria própria (2025).

4.4 Métodos de caracterização

O absorvedor têxtil desenvolvido nesta Tese fundamenta-se nos mecanismos de perda associados à condutividade elétrica e à permissividade dielétrica para a atenuação de ondas eletromagnéticas. Devido às suas características ôhmicas na interação com o campo, o material fabricado é classificado como um absorvedor resistivo.

No desenvolvimento de um absorvedor, é fundamental realizar a validação da eficiência do projeto por meio da sua caracterização eletromagnética, que consiste na medição dos níveis de absorção para verificar se a onda incidente sofre atenuação nos parâmetros de reflexão (S_{11}) e transmissão (S_{21}). A eficiência do material é determinada pela redução desses níveis; ou seja, quanto menores a reflexão e a transmissão da onda, maior a capacidade de dissipação do absorvedor. Após a obtenção de resultados satisfatórios, procede-se com as caracterizações elétrica, morfológica e estrutural para a compreensão das propriedades do material, as quais são fundamentais para identificar as propriedades físico-químicas do absorvedor produzido. Na caracterização elétrica são medidos os parâmetros de condutividade e da permissividade dielétrica da amostra. A caracterização estrutural e morfológica visa correlacionar a composição química ao arranjo físico do material.

A metodologia de caracterização do absorvedor foi dividida em eletromagnética, elétrica, morfológico e estrutural, conforme apresentação a seguir.

4.4.1 Caracterização eletromagnética

O bom desempenho de um absorvedor eletromagnético depende da atenuação das ondas eletromagnéticas incidentes na sua superfície. As medições das perdas são obtidas através das diferentes técnicas de medições das ondas refletidas e transmitidas. Na Tabela 5 é possível observar características que diferenciam as técnicas de medição de um absorvedor eletromagnético, e na Tabela 6 são apontadas as vantagens e limitações de cada técnica. É importante notar na Tabela 5 que os parâmetros S_{11} e S_{21} são determinados indiretamente através de métodos de conversão, a partir das medições de parâmetros dielétricos. Desse modo, as técnicas de medição das tabelas, servem tanto para as determinações dos parâmetros eletromagnéticos de reflexão e transmissão, quanto elétricos (propriedades dielétricas).

Tabela 5 - Comparação das técnicas de medição de materiais absorvedores eletromagnéticos

Técnicas de Medição	Sonda Coaxial	Linha de Transmissão	Espaço Livre	Cavidade Ressonante
Frequência de Operação	50MHz - 60GHz	50MHz - 60GHz	5GHz - 330GHz	5GHz - 20GHz
Propriedades Dielétricas	ϵ_r	ϵ_r , μ_r	ϵ_r , μ_r	ϵ_r , μ_r
Parâmetros-S	S_{11}	S_{11} , S_{21}	S_{11} , S_{21}	Fator-Q
Materiais	Espécies biológicas, líquidos	Guia de ondas	Sólidos grandes, líquidos	Guia de ondas
Perda	Alta	Média	Média	Baixa
Técnicas de Conversão	RFM	NRW , NIST	NRW , NIST	Frequência e fator-Q

Fonte: Adaptado de Sivakumar (2023).

Na avaliação das características eletromagnéticas do absorvedor têxtil produzido nesta Tese foi levado em consideração somente o parâmetro de transmissão, S_{21} , medido na distância de campo distante, calculado de acordo a abertura da antena e as frequências de ressonância. Para este tipo de avaliação, ou seja, no campo distante, o parâmetro de reflexão, S_{11} , não é relevante, pois as ondas refletidas não são significantes ao ponto de alterar a potência da fonte. Porém, na análise para o campo próximo, os valores de reflexão podem interferir na irradiação da fonte, o que não é o caso para a aplicação do absorvedor têxtil.

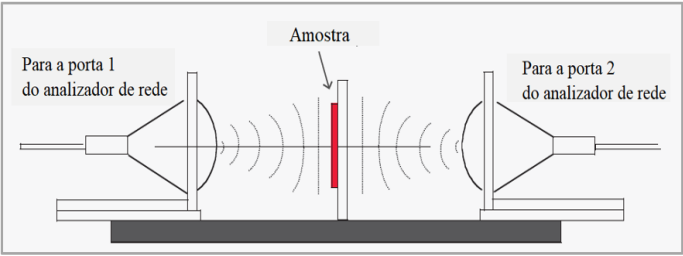
Na medição do parâmetro de transmissão S_{21} foi utilizado o método do espaço livre, por ser o mais recomendado para o tipo de aplicação do absorvedor proposto. O método do espaço livre consiste na montagem de duas antenas ligadas a um analisador de rede vetorial (VNA), apontadas uma para outra e obedecendo a distância mínima necessária do campo distante. Com o material absorvedor fixado a um suporte e posicionado entre as duas antenas, no meio do percurso, é medido o parâmetro S_{21} pelo VNA, conforme montagem ilustrada na Figura 18.

Tabela 6 - Vantagens e limitações das técnicas de medição de absorvedores eletromagnéticos

Técnicas de Medição	Vantagem	Desvantagem
Linha de Transmissão	Pode medir tanto a permeabilidade quanto a permissividade.	Limitação dos efeitos de entreferro.
Sonda Coaxial	Medição direta na amostra, sem a necessita de usinagem do material.	Medição influenciada pelos efeitos das lacunas de espaço livre.
Cavidade Ressonante	Capacidade de medição de amostras muito pequenas.	Limitação na largura de banda de medição.
Espaço Livre	Capacidade de medições em altas frequências. Medições não destrutivas de amostras.	Surgimento de múltiplas reflexões entre a amostra e a antena.

Fonte: Adaptado de Sivakumar (2023).

Figura 18 - Método do espaço livre

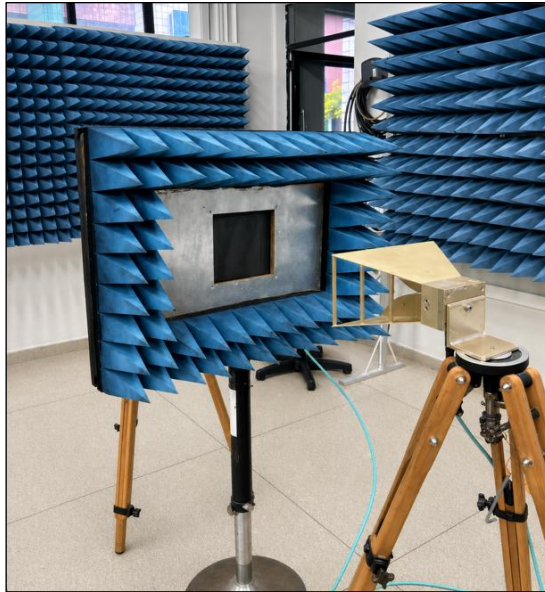


Fonte: Keysight (2020).

A caracterização eletromagnética foi dividida em duas etapas. Na primeira, denominada qualificação, avaliou-se um protótipo do absorvedor têxtil de grafite/PVA com o objetivo de validar a proposta desta Tese. As medições foram realizadas nas instalações do Laboratório de Medidas

em Telecomunicações do IFPB, campus de João Pessoa com VNA modelo E5071C da Agilent Technologies. Na Figura 19, é apresentada a configuração empregada para as medições do parâmetro S_{21} voltadas à qualificação do material. Nesse método, o absorvedor fabricado foi envolvido por uma placa condutora e espumas absorvedoras laterais, visando reduzir o espalhamento das ondas incidentes.

Figura 19 - Medição do parâmetro S_{21} do absorvedor pelo método do espaço livre



Fonte: Autoria própria (2025).

Os resultados foram comparados com as medições de um absorvedor comercial de espuma de poliuretano impregnada com ferrita de carbono da Soliani EMC (2026), com dimensões de 60 x 60 cm e espessura de 12 cm, conforme mostrado na Figura 20a.

Figura 20 - Absorvedores comerciais: (a) espuma da Soliani EMC; (b) película da Shenzhen

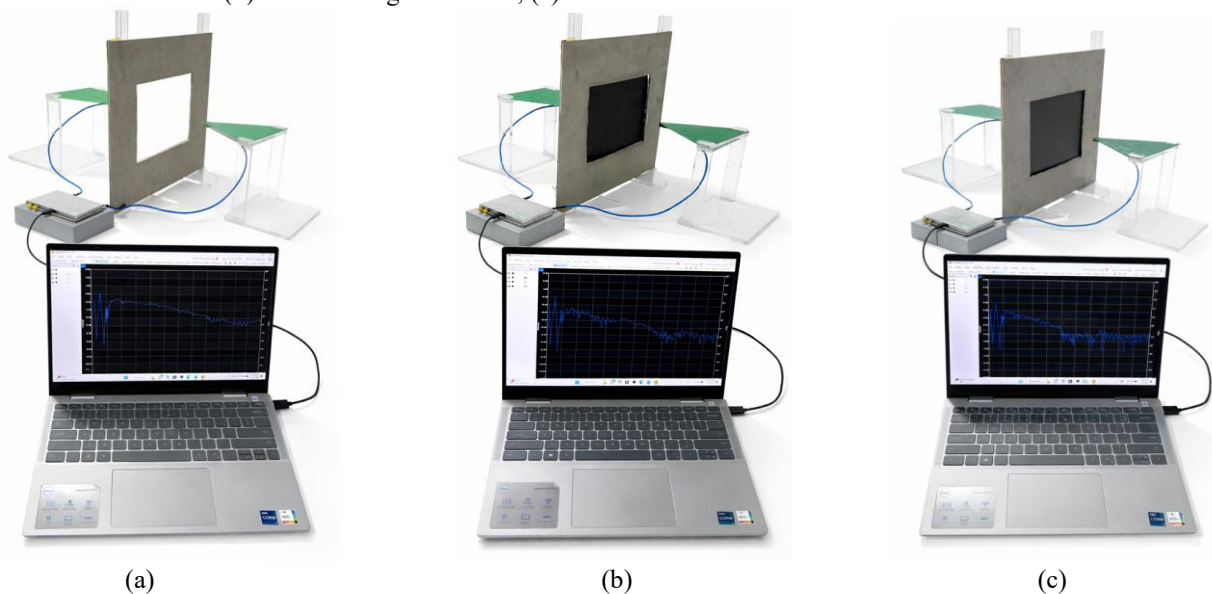


Fonte: Autoria própria (2025).

Na segunda etapa da caracterização eletromagnética, denominada validação, foram fabricados quatro absorvedores, identificados pelas numerações 1, 2, 3 e 4, com o objetivo de validar o projeto. As medições dos parâmetros de transmissão S_{21} foram realizadas no Laboratório de Telecomunicações do Departamento de Eletroeletrônica do IFMA, Campus Monte Castelo, com duas antenas log-periódicas UWB Wi-Fi de banda ultralarga (600 MHz – 6000 MHz, 50 W, 6 – 7 dB), separadas por uma distância que obedece ao critério de campo distante, e um analisador de rede vetorial (VNA) modelo LibreVNA (100 kHz – 6 GHz).

Na Figura 21a é mostrada a configuração (sem o absorvedor) para a medição do parâmetro de transmissão de referência, no qual é possível observar que nas laterais foi colocado um tecido de blindagem eletromagnética de cobre/níquel antirradiação para reduzir a passagem das ondas pelas laterais. Na Figura 21b apresenta-se o esquema de medição dos absorvedores fabricados, e para comprovar a eficiência do absorvedor produzido, os seus resultados foram comparados com um absorvedor comercial (Figura 21c), constituído por uma película absorvente magnética de tecido anti-interferência de radiação eletromagnética com 30 x 20 cm (largura e altura) e 0,5 mm de espessura, fabricado pela Shenzhen PH Functional Materials (Figura 20b).

Figura 21 - Medição do parâmetro S_{21} do absorvedor pelo método do espaço livre: (a) referência; (b) absorvedor grafite/PVA; (c) absorvedor comercial



Fonte: Autoria própria (2025).

4.4.2 Caracterização elétrica

No trabalho de desenvolvimento do absorvedor eletromagnético, as propriedades elétricas condutividade (σ) e dielétrica da permissividade complexa (ϵ_c) foram medidas para avaliar a tangente de perdas ($\tan \delta$) do material.

4.4.2.1 Medição da condutividade CC

O grafite na sua forma pura não é indicado, a princípio, para aplicações em absorvedores eletromagnéticos em razão da sua alta condutividade, porém quando adicionado em compósitos se torna interessante pelos seguintes motivos:

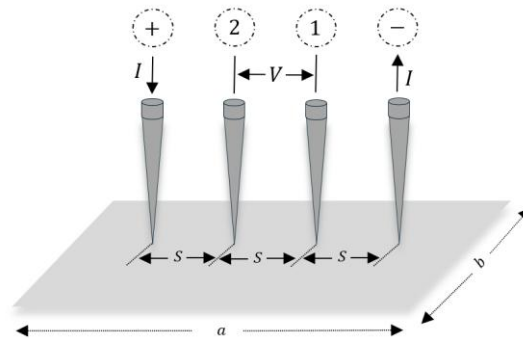
- a) É possível ajustar a condutividade da mistura entre o grafite e matrizes isolantes (como polímeros ou cerâmicas) para a fabricação de absorvedores resistivos;
- b) o controle da condutividade pode ser realizado através da dosagem do grafite na composição;
- c) a condutividade do grafite em pó diminui, principalmente quando disperso numa mistura, diferente do grafite puro compactado que é aplicado em escovas de máquinas rotativas, o qual possui boa condutividade.

A comprovação da absorção do absorvedor proposto pode ser realizada através das medições dos parâmetros de transmissão da caracterização eletromagnética. No entanto, é importante medir empiricamente a condutividade do material absorvedor para verificar a sua contribuição na tangente de perdas, em relação à permissividade, conforme equação 13. Para a medição da condutividade CC foi utilizado o método da sonda de quatro pontas que consiste na determinação indireta da condutividade da amostra do material, a partir da medição da resistividade. Este método é utilizado para a determinação da resistividade elétrica de condutores metálicos e semicondutores de amostras nas suas mais diversas geometrias (cilíndricas, circulares, quadradas etc.) ou arranjos de filmes finos depositados sobre substrato condutor ou isolante (Giroto, 2002).

O método das quatro pontas utiliza uma sonda composta de quatro terminais condutores colados à superfície da amostra. Uma corrente é injetada entre dois terminais da sonda e uma tensão é medida nos outros dois terminais, conforme Figura 22. A partir dos valores de tensão e corrente, e considerando a disposição desses terminais na superfície, é possível calcular analiticamente a resistência por unidade de superfície da amostra. Para simplificar o método de

cálculo, os terminais devem ser dispostos em linha e equidistantes, com o fluxo de corrente passando pelas duas sondas externas e a medição da tensão nas sondas internas. Outros parâmetros adicionais devem ser considerados no cálculo, como as dimensões da amostra e o posicionamento do conjunto de terminais.

Figura 22 – Método das quatro pontas em uma amostra retangular



Fonte: Adaptado de (Smits, 1958).

As medições de condutividade apresentadas nesta Tese foram realizadas no laboratório de Espectroscopia Vibracional e Impedância do Departamento de Física da Universidade Federal do Maranhão (UFMA), utilizando um equipamento denominado eletrômetro, fabricante Keithley, modelo 2401, que é um instrumento de alta sensibilidade empregado para medir pequenos valores de corrente e de tensão (Figura 23). O eletrômetro utilizado na medição possui uma fonte de corrente e um voltímetro, sendo, portanto, necessários quatro terminais para medir simultaneamente tensão na ordem de μV e corrente pA , e calcular a resistência numa faixa entre 0,2 M Ω e 200 M Ω , com resolução de 6½ dígitos.

Figura 23 - O eletrômetro



Fonte: Autoria própria (2026).

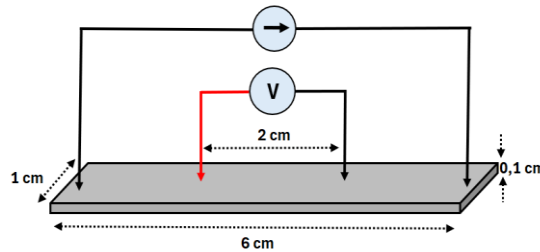
No método de medição da condutividade foram utilizados os quatro terminais do eletrômetro ligados a uma amostra do absorvedor fabricado, com 6 cm de comprimento e 1 cm de

largura, sendo que a espessura da amostra foi medida com micrômetro de precisão. Os quatro terminais foram dispostos linearmente na amostra, espaçados de 2 cm, sendo que os dois terminais externos foram ligados aos terminais da fonte de corrente, e os dois terminais internos ao voltímetro, conforme Figuras 24, 25a e 25b. A resistência da amostra, entre os dois terminais internos foi determinada pelo eletrômetro, e os parâmetros de resistividade e condutividade foram calculados, a partir das equações (36) e (37):

$$\rho = \frac{R \times A}{L}, \quad (36)$$

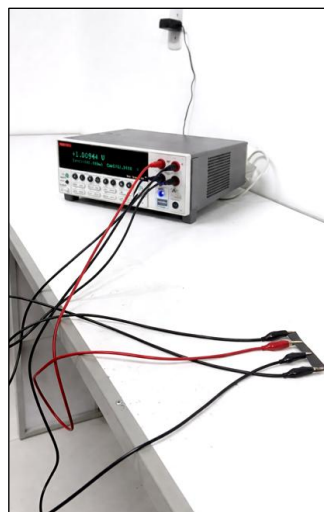
$$\sigma = \frac{1}{\rho}. \quad (37)$$

Figura 24 - Configuração na amostra para medição da condutividade



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 25 - Medição da condutividade com eletrômetro: (a) conexão do equipamento com a amostra; (b) detalhe da amostra



(a)



(b)

Fonte: Autoria própria (2026).

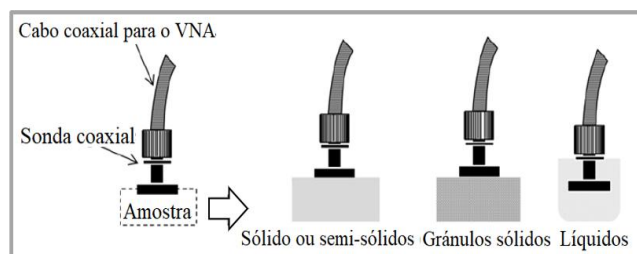
É importante esclarecer que o objetivo da medição da condutividade do absorvedor é apenas para comprovar que o material apresenta características resistivas. Por isso, não foi levada em consideração a precisão da medição, já que foram utilizadas pontas de prova do tipo garra, que possuem uma resistência de contato, embora desprezíveis em relação à resistência da amostra. Medições mais complexas, e com alta precisão, necessitam de tratamentos térmicos com pastas condutivas para ligar sondas à amostra.

4.4.2.2 Medidas da permissividade

Várias técnicas de medição da permissividade estão disponíveis para determinar propriedades dielétricas dos materiais em frequências de micro-ondas. Tais técnicas são identificadas a partir dos modos de medição, sendo, portanto, classificadas nos seguintes métodos: sonda coaxial; linha de transmissão; espaço livre; métodos de cavidade (Sivakumar, 2023). Cada método tem vantagens e desvantagens, considerando: o tipo de amostra que se deseja caracterizar, a faixa de frequência de interesse e as perdas proporcionadas na medição. Na Tabela 5 são relacionados os métodos de medição das propriedades dielétricas dos materiais, e na Tabela 6 são indicadas as vantagens e limitações de cada técnica. Lembrando que, conforme mencionado, esses métodos de medição permitem determinar não apenas ϵ_r e μ_r , mas também os parâmetros S.

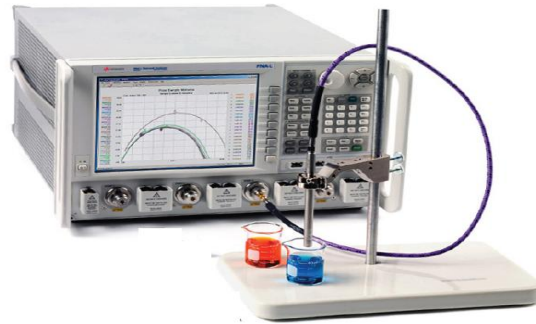
Dentre os métodos, a técnica de sonda coaxial foi a utilizada nesta Tese para a medição da permissividade do material devida a sua disponibilidade. O método utiliza uma sonda coaxial com uma abertura na sua extremidade, sendo inserida no material que se deseja determinar a permissividade, conforme ilustração da Figura 26. A sonda é conectada ao cabo coaxial do analisador de rede vetorial (VNA) que faz a leitura do coeficiente Γ , e então converte este valor nas permissividades ϵ' e ϵ'' , e na tangente de perdas $\tan \delta$ do material (ROHDE & SCHWARZ, 2012), de acordo com o esquema da Figura 27.

Figura 26 - Método da sonda coaxial



Fonte: Costanzo (2012).

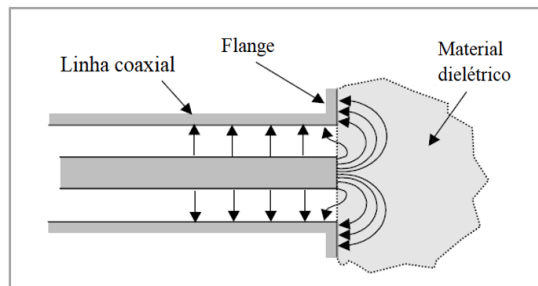
Figura 27 - Conexão do VNA na sonda coaxial



Fonte: Keysight (2020).

O princípio de funcionamento da sonda coaxial na determinação da permissividade se baseia na sua relação com coeficiente de reflexão na linha coaxial. Conforme ilustração da Figura 28, a onda eletromagnética gerada no VNA se propaga na linha coaxial até a sua extremidade, onde produz franjas nos campos eletromagnéticos que, dependendo do material dielétrico em contato, implicará em ondas refletidas (Clarke, 2007). Portanto, o coeficiente de reflexão dependerá da permissividade do material.

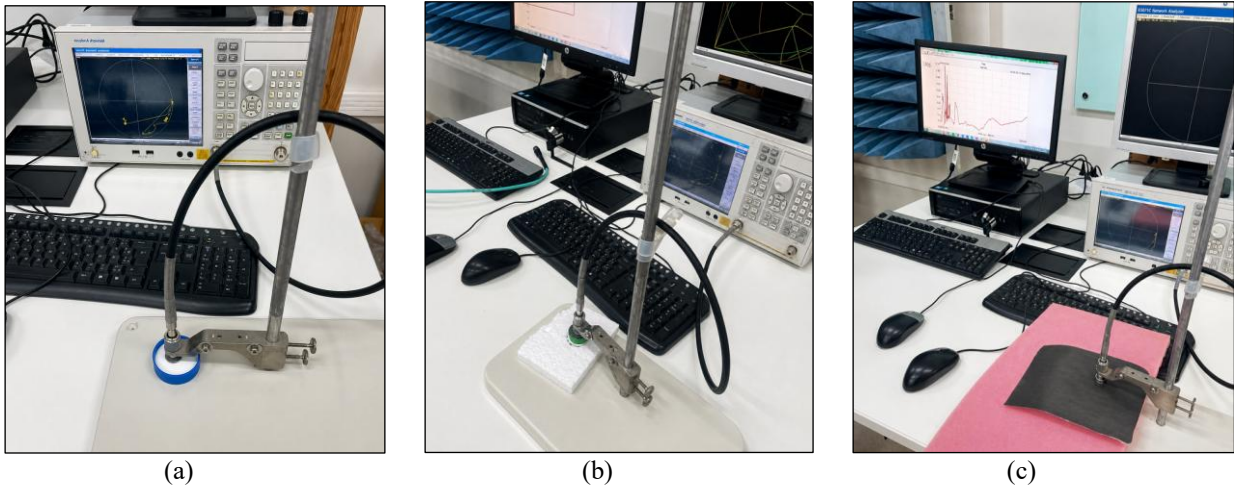
Figura 28 - OEM na sonda coaxial



Fonte: Clarke (2007).

As medições dos parâmetros ε' e ε'' dos materiais empregados na fabricação do absorvedor foram realizadas nas instalações do Laboratório de Medidas em Telecomunicações do IFPB, campus de João Pessoa com o analisador de rede vetorial (VNA) modelo E5071C adaptado com um kit de calibração WR-90 de fabricação da Agilent Technologies. Nas Figuras 29a, 29b e 29c são apresentadas, as medições realizadas das permissividades pelo método da sonda coaxial, da matriz de PVA líquida, do compósito de grafite/PVA e de uma amostra do material absorvedor produzido.

Figura 29 - Medições das permissividades complexas dos materiais: (a) PVA; (b) grafite/PVA; (c) absorvedor



Fonte: Autoria própria (2025).

4.5 Caracterizações morfológicas e estruturais

Além da avaliação das propriedades eletromagnéticas e elétricas, é imprescindível a aplicação de técnicas de caracterização complementares que fornecem um entendimento sobre a morfologia e estrutura química do absorvedor têxtil desenvolvido, permitindo comprovar as propriedades físicas e químicas esperadas.

4.5.1 Micrografia por microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A microscopia eletrônica de varredura é empregada para observar a morfologia e a microestrutura da superfície do absorvedor têxtil. A MEV permite visualizar a dispersão das partículas do grafite na matriz de poli(álcool vinílico), bem como a integridade do revestimento sobre o substrato têxtil. Essas informações são cruciais para entender como a microestrutura influencia a atenuação das ondas eletromagnéticas.

As imagens micrográficas do grafite e compósito absorvedor grafite/PVA foram realizadas no microscópio eletrônico de varredura da TESCAN (FEG) modelo MIRA4 LMU, no Laboratório de Microscopia Avançada do Programa de Pós-graduação em Educação, Ciência e Tecnologia dos Materiais (PPGCTM) do Instituto Federal do Maranhão (IFMA, 2025), como mostrado na Figura 30.

Figura 30- Microscópio eletrônico de varredura do laboratório PPGMEC



Fonte: (Instituto Federal do Maranhão (IFMA), 2025).

4.5.2 Difratometria de raios X (DRX)

A técnica da difração de raio-X (DRX) possibilita a identificação das fases cristalinas presentes no compósito de grafite e poli(álcool vinílico). Os resultados obtidos são fundamentais para a correlação entre a estrutura cristalina do grafite no compósito e seu desempenho nas propriedades de absorção de micro-ondas. As análises cristalográficas dos pós de grafite e compósito Grafite/PVA (absorvedor) foram realizadas pelo método da Difração de Raios X, da marca RIGAKU, modelo SmartLab SE, com radiação de Cr- $K\alpha$ ($K\alpha = 2.2897 \text{ \AA}$), proveniente de tubo de cromo, operado a tensão de 40 kV e corrente de 40 mA (Figura 31).

Figura 31- Difratometro de raios-X – RIGAKU - modelo SmartLab SE



Fonte: (DAIRIX, 2022).

4.5.3 Espectroscopia Raman

A espectroscopia Raman é particularmente eficaz para analisar materiais à base de carbono, como grafite, grafeno e nanotubos de carbono, possibilitando a avaliação do grau de ordenamento estrutural, defeitos cristalinos e possíveis interações entre a carga condutora e a matriz polimérica. Além disso, variações nas posições, intensidades e larguras das bandas Raman podem indicar mudanças químicas ou estruturais decorrentes do processamento do material. Essas informações são fundamentais para compreender como a estrutura molecular e eletrônica do compósito influencia suas propriedades dielétricas e eletromagnéticas, contribuindo para o desempenho do material como absorvedor de micro-ondas.

As medidas de espalhamento Raman do compósito absorvedor foram realizadas no Laboratório de Espectroscopia Vibracional e de Impedância (LEVI) da Universidade Federal do Maranhão em um espectrômetro Horiba/Jobin-Yvon, modelo T64000, acoplado a um microscópio Olympus BX41-Yvon (Figura 32).

Figura 32- Espectrômetro Raman do LEVI



Fonte: Autoria própria (2025).

4.5.4 Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)

A espectroscopia FTIR é empregada para a identificar as ligações químicas e os grupos funcionais presentes no compósito. Essa técnica permite a caracterização da química de superfície, bem como a detecção de eventuais modificações químicas decorrentes das etapas de

processamento. As informações obtidas são fundamentais para a compreensão da relação entre a estrutura química do compósito e seu desempenho nas propriedades de absorção de micro-ondas.

A espectroscopia FTIR do compósito do absorvedor foi realizada na Laboratório Central Analítica Multiusuária de Química (CAMQ) do Programa de Pós-Graduação em Química da Universidade Federal do Maranhão (UFMA, [s.d]) com o espectrômetro de infravermelho da marca Shimadzu, modelo IR Prestige 21 (Figura 33).

Figura 33 - Espectrômetro do infravermelho do laboratório CAMQ



Fonte: Autoria própria (2025).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

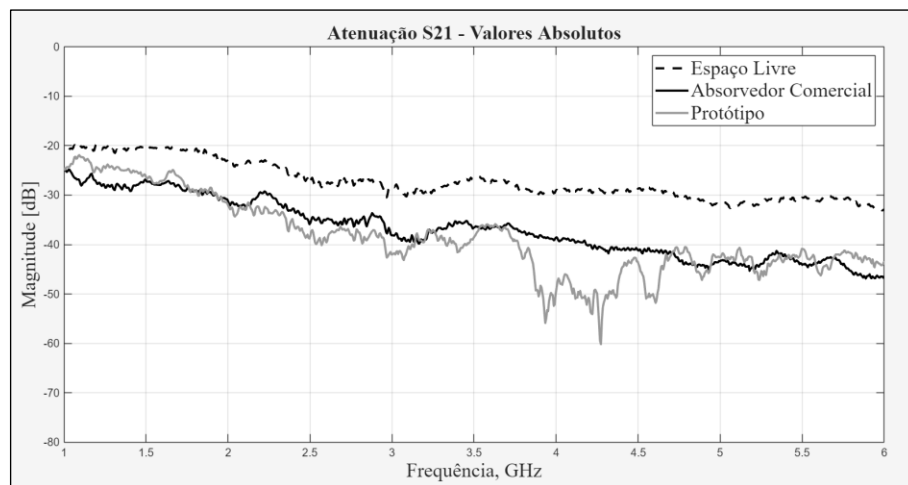
Nesta seção são apresentados e analisados os resultados da caracterização eletromagnética obtida a partir das medições dos níveis de atenuação do parâmetro S_{21} do absorvedor têxtil, seguidos dos resultados e avaliação da caracterização elétrica e análise morfológica e estrutural do material absorvedor fabricado, visando aprofundar o entendimento do mecanismo de absorção eletromagnética observado.

5.1 Caracterização eletromagnética

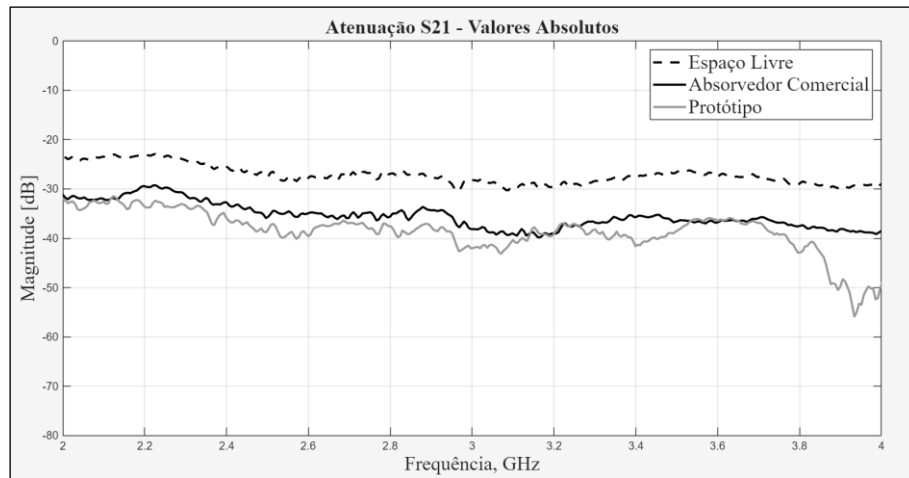
Os gráficos seguintes mostram os resultados das medições dos parâmetros de transmissão S_{21} , pelo método do espaço livre, em valores absolutos dos absorvedores têxteis de grafite/PVA. Os dados são comparados com as medições de referência (sem absorvedor) e com um absorvedor comercial, na faixa de frequência de 1 GHz a 6 GHz. Para melhorar a visualização, os resultados também são dispostos na faixa reduzida de interesse das bandas 4G e 5G, correspondente às frequências de 2 GHz a 4 GHz, nas formas abvisasolutas e relativas ao espaço livre.

Na Figura 34 podem ser visualizados os resultados das medições do parâmetro S_{21} do protótipo do absorvedor têxtil que permitiram qualificar a fabricação do absorvedor apresentado nesta Tese.

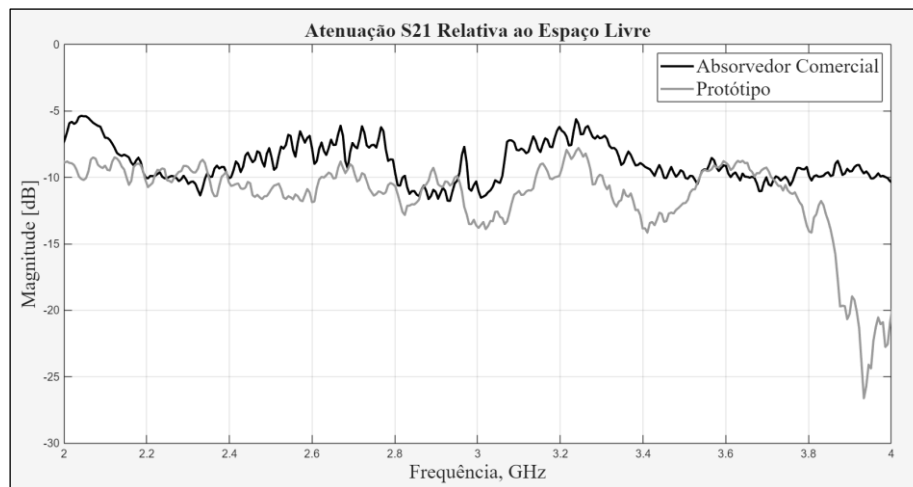
Figura 34 - Comparação do parâmetro S_{21} do protótipo com o absorvedor comercial: (a) valores absolutos de 1 a 6 GHz; (b) valores absolutos de 2 a 4 GHz; (c) valores relativos de 2 a 4 GHz



(a)



(b)



(c)

Fonte: Autoria própria (2026).

Nos gráficos da Figura 34a, 34b e 34c nota-se que as quedas do sinal produzidas pelo protótipo na faixa entre 2 GHz e 3 GHz, situam-se próximas de -10 dB, em relação a referência, o que corresponde a uma redução da potência da onda transmitida de pelo menos 90%. A partir de 3 GHz, o absorvedor protótipo apresenta quedas acentuadas do sinal, com uma sutil redução na atenuação (elevação na transmissão absoluta) na estreita faixa entre 3,2 GHz e 3,25 GHz. Constatase também que o desempenho do protótipo superou o do absorvedor comercial, constituído por espuma de poliuretano com ferrita de carbono (Figura 19a), em praticamente toda a faixa acima de 2,2 GHz. Convém ressaltar, contudo, que de acordo com as especificações técnicas do fabricante do absorvedor comercial (Soliani EMC, 2026), sua aplicação primária é voltada para a atenuação de parâmetros reflexivos (S_{11}) e não estritamente de transmissão (S_{21}). Portanto, os resultados

obtidos comprovam a eficiência da metodologia de fabricação desenvolvida para o absorvedor têxtil de grafite/PVA

Nas Figuras 35 a 38 são apresentados os resultados das medições do parâmetro S_{21} , correspondentes aos níveis de transmissão das ondas incidentes obtidos na etapa de validação de quatro absorvedores (1, 2, 3 e 4). As medições são comparadas diretamente com o espaço livre (referência) e com um absorvedor comercial do tipo película absorvente magnética de tecido anti-interferência (Figura 19b). Diferentemente do absorvedor em espuma de poliuretano com ferrita de carbono utilizado na etapa anterior (qualificação), a película absorvedora comercial adotada nesta fase destina-se à blindagem e ao isolamento de radiações eletromagnéticas, atuando predominantemente no parâmetro de transmissão S_{21} .

As dimensões das quatro amostras estão detalhadas na Tabela 7. Foram adotadas dimensões padronizadas de 20 cm x 30 cm para manter a equivalência com a película comercial. É importante observar que a espessura variou entre 0,96 mm e 1,05 mm, entretanto, a absorção no material é causada exclusivamente pela camada de grafite/PVA, visto que o substrato têxtil (*jeans*) atua somente como suporte ao compósito. A película absorvedora comercial não possui substrato e sua estrutura é formada apenas pelo material absorvedor.

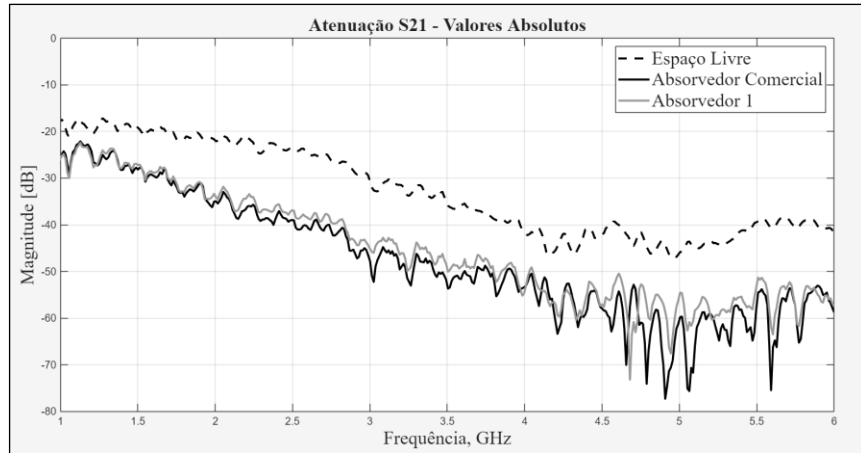
Tabela 7 - Dimensões das amostras dos absorvedores

Absorvedor	Espessura (mm)			Largura (cm)	Altura (cm)
	Camada de grafite/PVA	Jeans	Total		
1	0,369	0,6	0,969	30	20
2	0,454		1,054		
3	0,368		0,968		
4	0,375		0,975		
Comercial	-	-	0,50	30	20

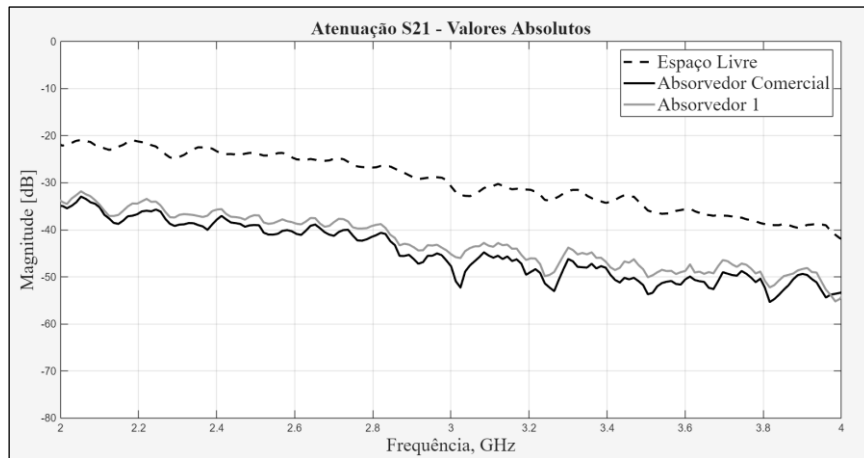
Fonte: Autoria própria (2026).

Na Figura 35 são apresentados os gráficos do parâmetro de transmissão S_{21} obtidos para o Absorvedor 1, na faixa de frequências de 1 GHz a 6 GHz (em valores absolutos) e de 2 GHz a 4 GHz (em valores absolutos e relativos), comparados ao espaço livre e ao absorvedor de película comercial. Esse critério de apresentação foi mantido para os absorvedores subsequentes (2, 3, e 4).

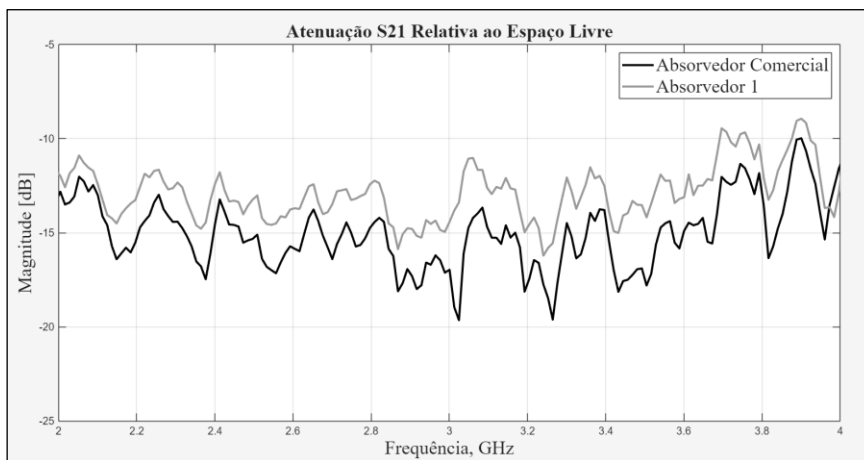
Figura 35 - Comparação do parâmetro S_{21} , do Absorvedor 1 e o absorvedor comercial: (a) valores absolutos de 1 a 6 GHz; (b) valores absolutos de 2 a 4 GHz; (c) valores relativos de 2 a 4 GHz



(a)



(b)



(c)

Fonte: Autoria própria (2026).

Os resultados do Absorvedor 1 nos gráficos das Figuras 35a, 35b e 35c, embora apresentem atenuações ligeiramente inferiores às do absorvedor comercial, ficaram abaixo de -10 dB em relação ao espaço livre, em toda a faixa de 2 GHz a 4 GHz. Acima de 4 GHz, verificou-se uma redução na eficiência da atenuação na faixa entre 4 GHz e 5,2 GHz, sendo que a partir de 5,2 GHz até 6 GHz, os níveis de atenuação voltaram a cair.

Conforme o resumo estatístico apresentado na Tabela 8, as atenuações médias do Absorvedor 1, em subfaixas de 500 MHz, variaram entre -11,59 dB e -13,83 dB. As maiores atenuações pontuais identificadas em cada subfaixa ficaram entre -14,18 dB (na frequência de 3,50 GHz) e -16,21 dB (na frequência de 3,24 GHz).

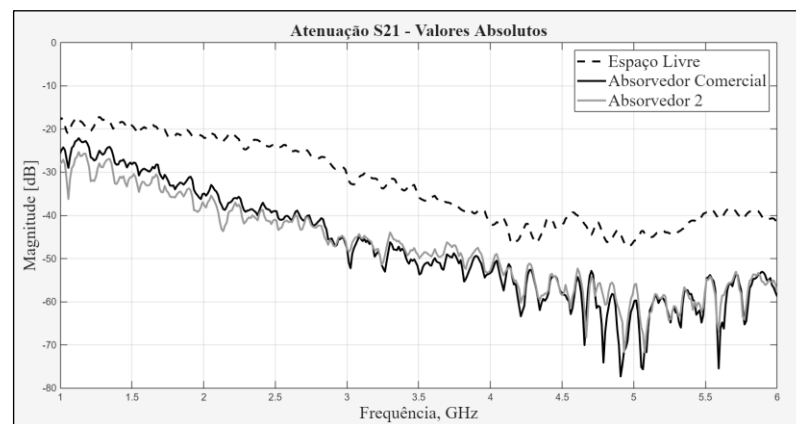
Tabela 8 - Resumo do desempenho do Absorvedor 1 em relação ao absorvedor comercial

Faixa (GHz)	Atenuação média (dB)		Maior atenuação (dB)		Frequência da maior atenuação (GHz)	
	Comercial	Absorvedor 1	Comercial	Absorvedor 1	Comercial	Absorvedor 1
2,0 - 2,5	-14,52	-12,87	-17,47	-14,78	2,38	2,36
2,5 - 3,0	-15,92	-13,83	-18,11	-15,87	2,87	2,87
3,0 - 3,5	-16,14	-13,30	-19,64	-16,21	3,02	3,24
3,5 - 4,0	-13,56	-11,59	-17,80	-14,18	3,50	3,50

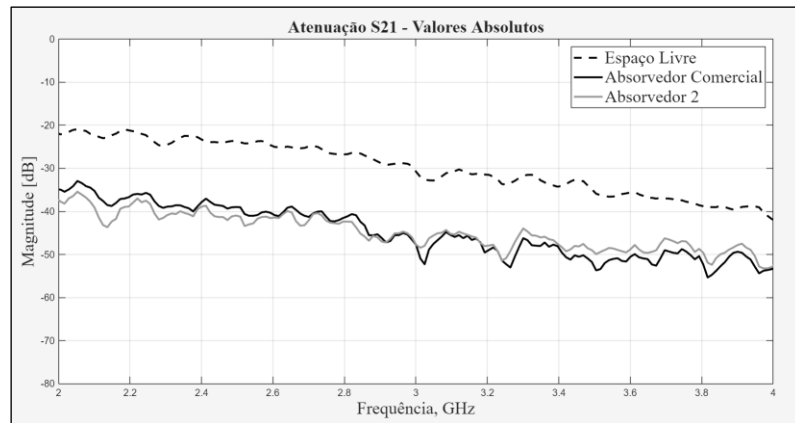
Fonte: Autoria própria (2026).

Na Figura 36 são apresentados os gráficos do parâmetro de transmissão S_{21} obtidos para o Absorvedor 2.

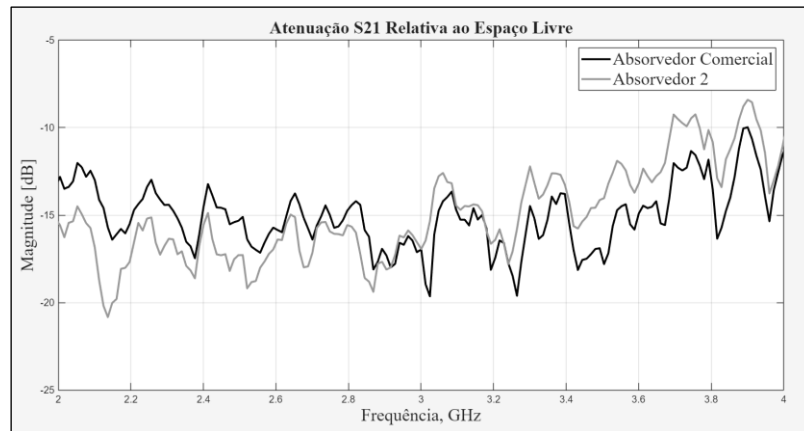
Figura 36 - Comparação do parâmetro S_{21} , do Absorvedor 2 e o absorvedor comercial: (a) valores absolutos de 1 a 6 GHz; (b) valores absolutos de 2 a 4 GHz; (c) valores relativos de 2 a 4 GHz



(a)



(b)



(c)

Fonte: Autoria própria (2026).

De acordo com os gráficos das Figuras 36a, 36b e 36c, o Absorvedor 2 obteve atenuações maiores em relação ao Absorvedor 1 em toda a faixa de medição. Adicionalmente, o desempenho desse absorvedor superou o do absorvedor comercial na janela compreendida entre 2 GHz e 3 GHz. No entanto, as caracterizações elétricas precisam ser avaliadas para estimar a impedância de entrada e, como consequência, o seu coeficiente de reflexão.

No resumo estatístico apresentado na Tabela 9, as atenuações médias do Absorvedor 2, em subfaixas de 500 MHz, variaram entre -11,35 dB e -16,96 dB. As maiores atenuações pontuais identificadas em cada subfaixa ficaram entre -14,03 dB (em 3,5 GHz) e -20,83 dB (em 2,14 GHz).

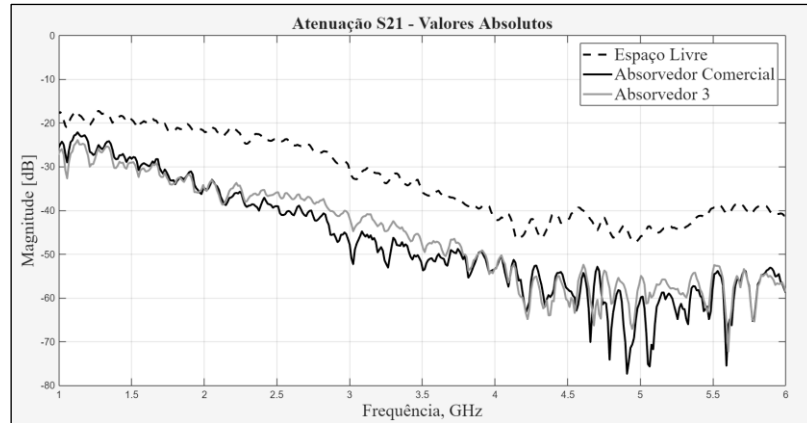
Tabela 9 - Resumo do desempenho do Absorvedor 2 em relação ao absorvedor comercial

Faixa (GHz)	Atenuação média (dB)		Maior atenuação (dB)		Frequência da maior atenuação (GHz)	
	Comercial	Absorvedor 2	Comercial	Absorvedor 2	Comercial	Absorvedor 2
2,0 - 2,5	-14,52	-16,96	-17,47	-20,83	2,38	2,14
2,5 - 3,0	-15,92	-16,93	-18,11	-19,38	2,87	2,87
3,0 - 3,5	-16,14	-14,58	-19,64	-17,81	3,02	3,24
3,5 - 4,0	-13,56	-11,35	-17,80	-14,03	3,50	3,50

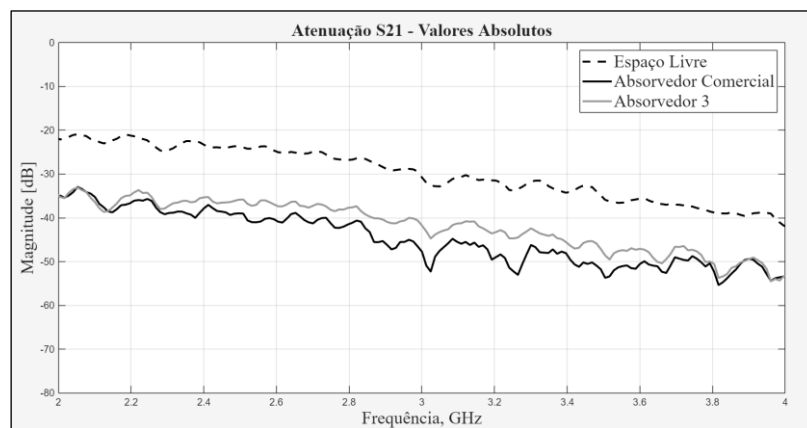
Fonte: Autoria própria (2026).

Na Figura 37 são apresentados os gráficos do parâmetro de transmissão S_{21} obtidos para o absorvedor 3.

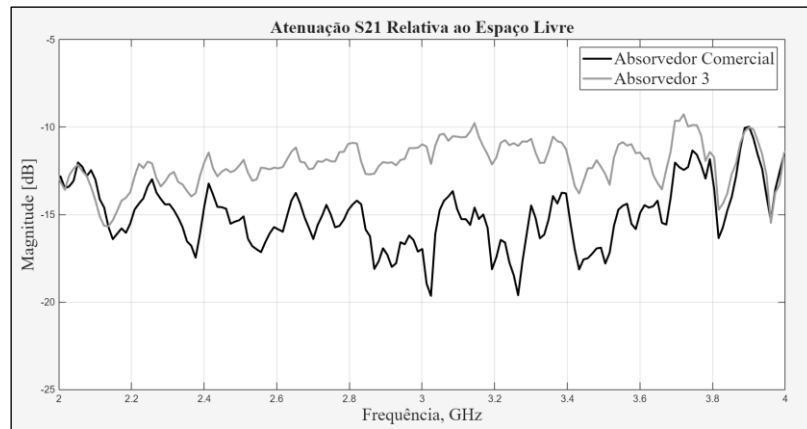
Figura 37 - Comparação do parâmetro S_{21} do Absorvedor 3 e o absorvedor comercial: (a) valores absolutos de 1 a 6 GHz; (b) valores absolutos de 2 a 4 GHz; (c) valores relativos de 2 a 4 GHz



(a)



(b)



(c)

Fonte: Autoria própria (2026).

As atenuações produzidas pelo Absorvedor 3, de acordo com os gráficos das Figuras 37a, 37b e 37c, mantiveram-se abaixo do limiar de -10 dB em toda a faixa avaliada de 2 GHz a 4 GHz. No entanto, a sua magnitude de atenuação mostrou-se inferior à registrada para o Absorvedor 2, o que é justificado pela redução na espessura do compósito de grafite/PVA nesta amostra (Tabela 7).

No resumo estatístico apresentado na Tabela 10, as atenuações médias do Absorvedor 3, em subfaixas de 500 MHz, variaram entre -11,31 dB e -13,16 dB. As maiores atenuações pontuais identificadas em cada subfaixa ficaram entre -13,06 dB (em 2,53 GHz) a -15,66 dB (em 2,14 GHz).

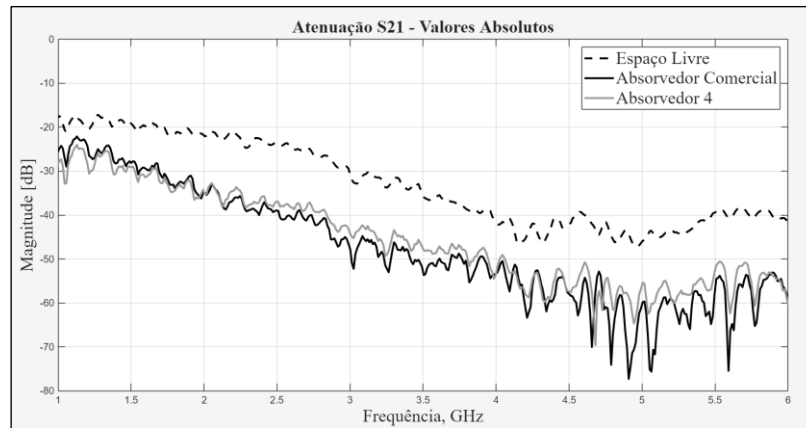
Tabela 10 - Resumo do desempenho do Absorvedor 3 em relação ao absorvedor comercial

Faixa (GHz)	Atenuação média (dB)		Maior atenuação (dB)		Frequência da maior atenuação (GHz)	
	Comercial	Absorvedor 3	Comercial	Absorvedor 3	Comercial	Absorvedor 3
2,0 - 2,5	-14,52	-13,16	-17,47	-15,66	2,38	2,14
2,5 - 3,0	-15,92	-11,97	-18,11	-13,06	2,87	2,53
3,0 - 3,5	-16,14	-11,31	-19,64	-13,79	3,02	3,43
3,5 - 4,0	-13,56	-11,73	-17,80	-15,47	3,50	3,96

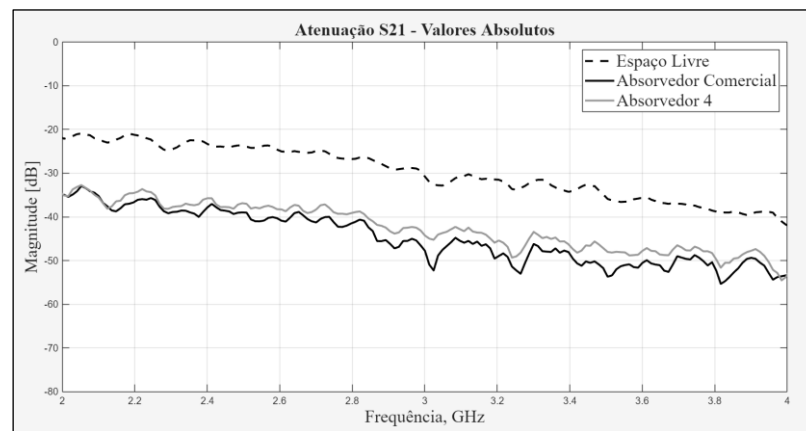
Fonte: Autoria própria (2026).

Na Figura 38 são apresentados os gráficos do parâmetro de transmissão S_{21} obtidos para o Absorvedor 4.

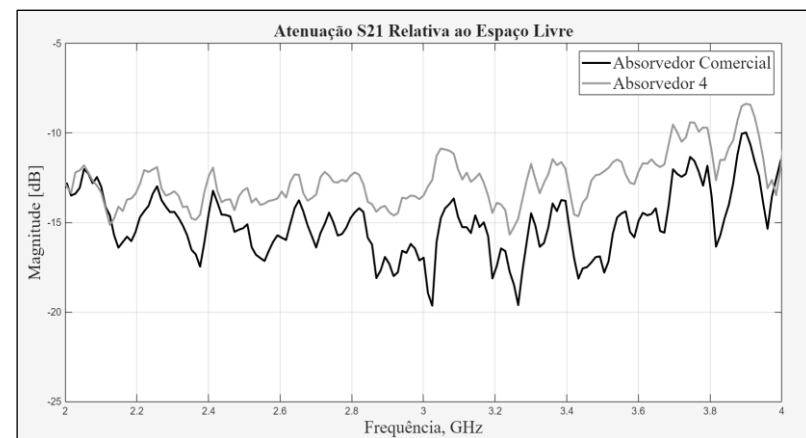
Figura 38 - Comparação do parâmetro S_{21} do Absorvedor 4 e o absorvedor comercial: (a) valores absolutos de 1 a 6 GHz; (b) valores absolutos de 2 a 4 GHz; (c) valores relativos de 2 a 4 GHz



(a)



(b)



(c)

Fonte: Autoria própria (2026).

Semelhante aos desempenhos dos absorvedores 1, 2 e 3, o Absorvedor 4 apresentou atenuações abaixo de -10 dB em toda a faixa de 2 GHz a 4 GHz, conforme os gráficos das Figuras 38a, 38b e 38c.

No resumo estatístico apresentado na Tabela 11, as atenuações médias do Absorvedor 4, em subfaixas de 500 MHz, variaram entre -10,99 dB e -13,36 dB. As maiores atenuações pontuais identificadas em cada subfaixa ficaram entre -13,48 dB (em 3,98 GHz) e -15,68 dB (em 3,24 GHz).

Tabela 11 - Resumo do desempenho do Absorvedor 4 em relação ao absorvedor comercial

Faixa (GHz)	Atenuação média (dB)		Maior atenuação (dB)		Frequência da maior atenuação (GHz)	
	Comercial	Absorvedor 4	Comercial	Absorvedor 4	Comercial	Absorvedor 4
2,0 - 2,5	-14,52	-13,34	-17,47	-15,13	2,38	2,12
2,5 - 3,0	-15,92	-13,36	-18,11	-14,60	2,87	2,92
3,0 - 3,5	-16,14	-12,87	-19,64	-15,68	3,02	3,24
3,5 - 4,0	-13,56	-10,99	-17,80	-13,48	3,50	3,98

Fonte: Autoria própria (2026).

As quatro amostras de absorvedores apresentaram desempenhos satisfatórios, visto que os níveis médios de atenuação se mantiveram além do limiar proposto de -10 dB em toda a banda de interesse (2 GHz a 4 GHz). Contudo, vale destacar a correlação entre a espessura de cada amostra (Tabela 7) e os seus respectivos níveis de absorção eletromagnética. Na caracterização eletromagnética, o Absorvedor 2 apresentou os melhores resultados devido à sua maior espessura. Esse comportamento indica que, quanto maior for a quantidade de compósito de grafite/PVA depositada na superfície têxtil, maior será a espessura final e, conseqüentemente, mais condutivo o material tenderá a ser. No entanto, essa condutividade impacta significativamente a impedância do material, resultando no aumento da reflexão. Adicionalmente, o compromisso com a flexibilidade e a leveza não pode ser desprezado na etapa de fabricação do absorvedor. A relação entre a espessura e a condutividade do material precisa ser comprovada a partir da caracterização elétrica que é apresentada a seguir.

5.2 Caracterização elétrica

Os resultados da caracterização elétrica do material absorvedor, obtidos por meio de medições de condutividade CC e permissividade, permitem quantificar a magnitude das perdas ôhmicas e a contribuição das perdas dielétricas (por polarização) do compósito produzido.

5.2.1 Medição da condutividade CC

Na Tabela 12 são apresentados os resultados das medições das resistências elétricas e as estimativas de condutividade CC dos quatro absorvedores fabricados. Para a realização das medições, foram retiradas três amostras de cada absorvedor com as dimensões de 1 cm de largura por 6 cm de comprimento. Os pontos de medição efetivos para a determinação da condutividade foram de 1 cm de largura por 2 cm de comprimento, sendo que a espessura foi medida, conforme a configuração ilustrada na Figura 24. O eletrômetro (Figura 23) injetou valores automáticos de corrente que variaram entre 1 mA e 100 mA, de acordo com as resistências das amostras (Tabela 12). A partir das tensões medidas e das resistências calculadas pelo eletrômetro, as resistividades e condutividades de cada amostra foram determinadas analiticamente pelas equações (36) e (37).

Observa-se, na Tabela 12, que os menores valores de condutividade foram obtidos nas amostras do Absorvedor 1, variando entre 1,04 S/m e 1,84 S/m (média de 1,36 S/m), e os maiores valores foram registrados no Absorvedor 2, variando entre 5,66 S/m e 9,90 S/m (média de 7,29 S/m). Desse modo, é possível estimar a resistividade e a condutividade do material absorvedor têxtil de grafite e PVA, em torno de $10^{-1} \Omega \cdot m$ e $10^1 S/m$, respectivamente, diferente do grafite puro que possui uma resistividade de $10^{-5} \Omega \cdot m$ (Callister & Rethwisch, 2021) e condutividade de $10^5 S/m$ (Kasap, 2018). O absorvedor têxtil fabricado apresenta baixa condutividade quando comparado ao grafite puro, evidenciando que as propriedades resistivas atuam nas perdas por efeito Joule no processo de absorção eletromagnética.

Os dados estatísticos das medições da Tabela 12 são apresentados na Tabela 13. Na análise estatística do conjunto de medições, as médias das resistividades e condutividades foram respectivamente, $0,35 \Omega \cdot m$ e $4,43 S/m$. No entanto, a interpretação isolada desses valores é insuficiente para descrever o comportamento real das amostras. O desvio padrão de 2,47 na condutividade sugere uma variação causada pelo método de deposição da mistura do grafite/PVA no material têxtil. Os desvios dos resultados das amostras são justificados pela variação na forma de impregnação do compósito no tecido. Isto pode ser explicado pela forte correlação positiva de 0,70 entre a espessura e a condutividade do absorvedor.

Entre os quatro absorvedores testados, as amostras do Absorvedor 2, que apresentaram as maiores espessuras de compósito (0,454 mm), obtiveram as maiores condutividades. Consequentemente, resultaram em maiores atenuações das ondas transmitidas, conforme os resultados da caracterização eletromagnética. Entretanto, cabe ressaltar que elevadas

condutividades associadas a grandes atenuações na transmissão podem indicar altos níveis de potência refletida. Para maximizar a absorção, é desejável conciliar a atenuação da potência incidente a uma condutividade otimizada do material, minimizando reflexões indesejadas na superfície.

Tabela 12 - Resultados das medições das condutividades das amostras dos absorvedores

Absorvedor	Amostra	Corrente (mA)	Resistência (Ω)	Distância (m)	Espessura (m)	Largura (m)	Área (m ²)	Resistividade ($\Omega \cdot m$)	Condutividade (S/m)	Condutividade Média(S/m)
1	1	100	2950	0,02	3,69E-04	0,01	3,69E-06	0,544	1,84	1,36
	2	100	4500	0,02	3,69E-04	0,01	3,69E-06	0,830	1,20	
	3	100	5200	0,02	3,69E-04	0,01	3,69E-06	0,959	1,04	
2	1	1	778	0,02	4,54E-04	0,01	4,54E-06	0,177	5,66	7,29
	2	1	700	0,02	4,54E-04	0,01	4,54E-06	0,159	6,29	
	3	1	445	0,02	4,54E-04	0,01	4,54E-06	0,101	9,90	
3	1	1	1420	0,02	3,68E-04	0,01	3,68E-06	0,261	3,83	3,95
	2	1	1850	0,02	3,68E-04	0,01	3,68E-06	0,340	2,94	
	3	1	1069	0,02	3,68E-04	0,01	3,68E-06	0,197	5,08	
4	1	1	934	0,02	3,75E-04	0,01	3,75E-06	0,175	5,71	5,14
	2	1	900	0,02	3,75E-04	0,01	3,75E-06	0,169	5,93	
	3	1	1410	0,02	3,75E-04	0,01	3,75E-06	0,264	3,78	

Fonte: Autoria própria (2026).

Tabela 13 - Estatísticas das medições das condutividades das amostras dos absorvedores

Absorvedor	Amostra	Espessura (m)	Resistividade ($\Omega \cdot m$)	Condutividade (S/m)	Condutividade Média(S/m)
1	1	3,69E-04	0,54	1,84	1,36
	2	3,69E-04	0,83	1,20	
	3	3,69E-04	0,96	1,04	
2	1	4,54E-04	0,18	5,66	7,29
	2	4,54E-04	0,16	6,29	
	3	4,54E-04	0,10	9,90	
3	1	3,68E-04	0,26	3,83	3,95
	2	3,68E-04	0,34	2,94	
	3	3,68E-04	0,20	5,08	
4	1	3,75E-04	0,18	5,71	5,14
	2	3,75E-04	0,17	5,93	
	3	3,75E-04	0,26	3,78	
Média ($\bar{x}$)		3,92E-04	0,35	4,43	4,43
Desvio padrão (s)		3,78E-05	0,28	2,54	2,47
Correlação com a espessura (r)		-	-0,46	0,70	0,80

Fonte: Autoria própria (2026).

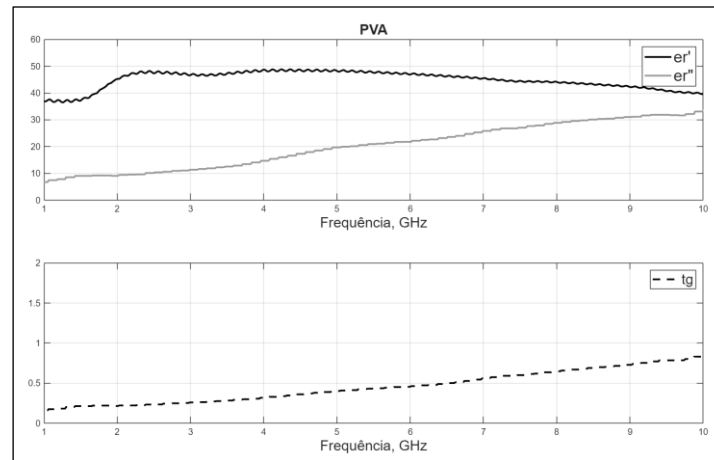
5.2.2 Medição da permissividade efetiva

A medição da condutividade do absorvedor possibilitou o entendimento de que as perdas do material são influenciadas pela condutividade do grafite. Se o grafite estiver puro ou em alta concentração em um compósito, ele se comporta quase como um condutor, causando reflexão da onda incidente. No entanto, se estiver disperso em um material polimérico, como o PVA, as perdas dielétricas ou por polarização somam-se à condutividade, influenciando também a absorção eletromagnética. Portanto, as medições das propriedades dielétricas de um material fornecem sua constante dielétrica ou permissividade real (ϵ') e suas perdas dielétricas ou permissividade imaginária (ϵ'').

Nessa etapa da caracterização elétrica, foram avaliadas as propriedades dielétricas dos materiais utilizados no absorvedor, em suas formas isoladas e compostas, por meio da medição da permissividade complexa $\epsilon_c = \epsilon' - j\epsilon''$ e da respectiva determinação da tangente de perdas $\tan \delta = \epsilon''/\epsilon'$, utilizando o método da sonda coaxial. As caracterizações dielétricas foram realizadas em três etapas, compreendendo, inicialmente, as medições das soluções de PVA e do compósito de grafite/PVA (Figuras 29a e 29b). Em seguida, foram realizadas as medições do mesmo compósito na forma sólida e seco presente no material têxtil (Figura 29c). Nas Figuras 39, 40 e 41 podem ser observados os resultados das medições dielétricas das permissividades relativas real (ϵ'_r) e imaginária (ϵ''_r), e das tangentes de perdas ($\tan \delta = \epsilon''_r / \epsilon'_r$), do PVA e do grafite, numa faixa de 1 GHz a 10 GHz.

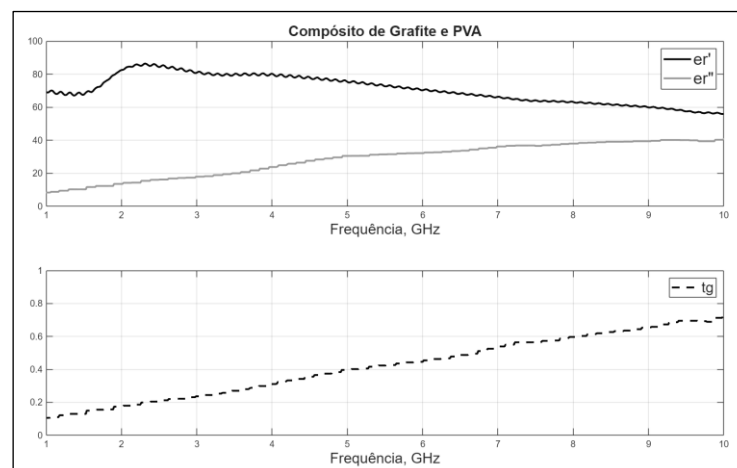
Na medição das soluções dos compostos, a sonda coaxial foi introduzida em um recipiente contendo o material. Embora as características dielétricas da solução de PVA e do compósito grafite/PVA não representem o mesmo comportamento dielétrico do absorvedor têxtil, suas medições serviram para identificar preliminarmente as características dos materiais antes do processo de colagem e secagem no tecido. Observando os gráficos da Figura 39, na faixa de 2 GHz a 4 GHz, a solução do PVA apresentou variações aproximadas nas permissividades entre $45 < \epsilon'_r < 49$ e $9 < \epsilon''_r < 15$, e tangente de perdas $0,2 < \tan \delta < 0,36$. O compósito de grafite/PVA (Figura 40) apresentou variações nas permissividades entre $80 < \epsilon'_r < 86$ e $13 < \epsilon''_r < 24$, e tangente de perdas entre $0,17 < \tan \delta < 0,3$. Por último, o material absorvedor têxtil (Figura 41) variou entre $8,5 < \epsilon'_r < 9$ e $1 < \epsilon''_r < 1,2$, e com tangentes de perdas entre $0,1 < \tan \delta < 0,15$.

Figura 39 - Medições das permissividades e tangente de perdas da solução de PVA



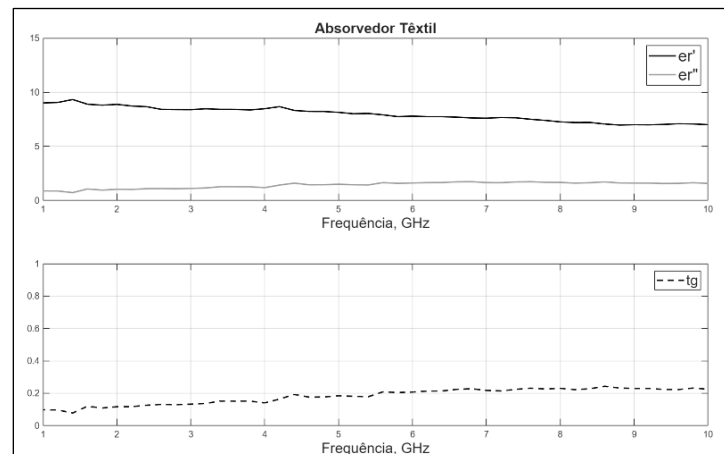
Fonte: Autoria própria (2026).

Figura 40 - Medições das permissividades e tangente de perdas do compósito de grafite/PVA



Fonte: Autoria própria (2026).

Figura 41 - Medições das permissividades e tangente de perdas do absorvedor têxtil



Fonte: Autoria própria (2026).

O método da sonda coaxial é mais apropriado para medições em materiais líquidos e semissólidos, sendo mais difícil a obtenção de resultados precisos em materiais sólidos, finos e com certa condutividade. Os resultados apresentados nos gráficos da Figura 41 correspondem apenas ao Absorvedor 1, uma vez que materiais com alta condutividade produzem permissividades elevadas e imprecisas.

Na tabela 14, pode ser observado um resumo das medições das perdas dielétricas na faixa de 2 GHz a 4 GHz das amostras. Os resultados na tabela foram colocados na ordem das medições.

Tabela 14 - Resumo das medições dielétricas na faixa de 2 GHz a 4 GHz

Perdas Dielétricas na Faixa de 2 - 4 GHz			
Amostra	ϵ'_r	ϵ''_r	$\tan \delta$
PVA	45 a 49	9 a 15	0,2 a 0,36
Grafite/PVA	80 a 86	13 a 24	0,17 a 0,3
Absorvedor	8,5 a 9	1 a 1,2	0,1 a 0,15

Fonte: Autoria própria (2026).

Amostras sólidas e finas, mesmo apresentando perdas ôhmicas, mas com certa condutividade, apresentam limitações na medição da permissividade pelo método da sonda coaxial. Como o método se baseia na reflexão do campo elétrico na interface plana entre a ponta da sonda e o material, ocorrem as seguintes limitações:

- qualquer imperfeição na superfície de contato da sonda com o material cria bolsas microscópicas de ar entre a sonda e a amostra. Como o ar possui constante dielétrica $\epsilon_r \approx 1$, isso introduz erros significativos na medição;
- o campo elétrico gerado pela ponta da sonda necessita de uma espessura mínima de amostra para evitar que a onda atravesse o material e reflita no suporte ou na bancada de ensaio, alterando os resultados;
- a condutividade do material absorve e reflete grande parte da energia incidente. O *software* calcula a permissividade imaginária (ϵ'') a partir dos coeficientes de reflexão (S_{11}). Em amostras de condutividade mais alta, o valor estimado de ϵ'' cresce excessivamente, saturando o algoritmo de conversão e resultando em valores instáveis ou irreais.

Com relação aos resultados das propriedades dielétricas dos materiais envolvidos, cabe um esclarecimento sobre a notação ε_r' e ε_r'' gerada pelo *software* do equipamento. No método da sonda coaxial, o programa fornece os valores de ε_r' , que correspondem à constante dielétrica relativa do material na faixa de frequência analisada; contudo, os resultados de ε_r'' correspondem às perdas dielétricas relativas totais no material, sendo equivalente à condutividade efetiva apresentada nas equações (8) e (13) desta Tese, devendo-se ressaltar que os valores de permissividade apresentados são relativos. Isso ocorre porque o equipamento não distingue as perdas por polarização das perdas por condução, visto que utiliza o parâmetro de reflexão para determinar indiretamente os resultados.

A partir dos resultados obtidos é possível identificar que:

- a) a solução de PVA e o compósito de grafite/PVA apresentaram valores expressivos de ε_r'' e $\tan \delta$ devido à presença de água na mistura, uma vez que as moléculas de água provocam elevadas perdas por polarização. Conforme já mencionado, a medição do compósito de grafite/PVA serve apenas como avaliação inicial, visto que o absorvedor final passou por um processo de secagem no material têxtil;
- b) o compósito de grafite/PVA apresentou um aumento na permissividade ε_r'' em relação à solução de PVA, pois o grafite introduz polarizações interfaciais quando disperso no PVA, além de perdas ôhmicas devidas à sua condutividade;
- c) o absorvedor, constituído pelo material sólido resultante da mistura de grafite/PVA depositada no tecido, apresentou perdas bem abaixo daquelas observadas na solução de grafite/PVA. Esse resultado é esperado, visto que a solução secou no material têxtil, eliminando a influência das moléculas de água;
- d) a tangente de perdas do absorvedor aumentou com a frequência. Para baixas frequências, a contribuição predominante foi da condutividade CC. No entanto, à medida que a frequência se elevou, a contribuição do termo $\omega\varepsilon_r''$ aumentou a condutividade, gerando um crescimento na tangente de perdas.

As medições das permissividades real e imaginária apresentadas nos gráficos da Figura 41 permitem estimar analiticamente a impedância de entrada (Z_{in}) do absorvedor têxtil por meio da equação (24). Na Tabela 15, são apresentados os resultados das impedâncias de entrada em 2,5 GHz e 3,5 GHz para o Absorvedor 1, cuja espessura está especificada na Tabela 7. Os valores de Z_{in} mostram uma proximidade com a impedância do espaço livre ($Z_0 \approx 377 \Omega$), o que sugere

que uma parcela significativa da onda incidente penetra no absorvedor. Ademais, vale observar que:

- a) a parte real indica a componente resistiva responsável pela dissipação de potência eletromagnética no interior da matriz condutiva;
- b) a parte imaginária expressa características capacitivas da estrutura. Essa reatância implica em um descasamento na interface de entrada, sendo a principal responsável por limitar o casamento, causando uma reflexão residual.

Tabela 15 - Impedância de entrada estimada em 2,5 GHz e 3,5 GHz

Impedância Z_{in} estimada do Absorvedor 1				
Frequência (GHz)	d (mm)	ϵ'_r	ϵ''_r	$Z_{in}(\Omega)$
2,5	0,369	8,7	1,1	360,5 - j52,2
3,5	0,369	8,4	1,2	350,3 - j67,3

Fonte: Autoria própria (2026).

5.3 Caracterizações morfológicas e estruturais

Os resultados das caracterizações morfológicas e estruturais do material absorvedor, realizadas por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV), difração de raios X (DRX) e espectroscopias FTIR e Raman, visam evidenciar de forma complementar as contribuições e interações do grafite e da matriz de poli (álcool vinílico) (PVA) no compósito produzido.

5.3.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

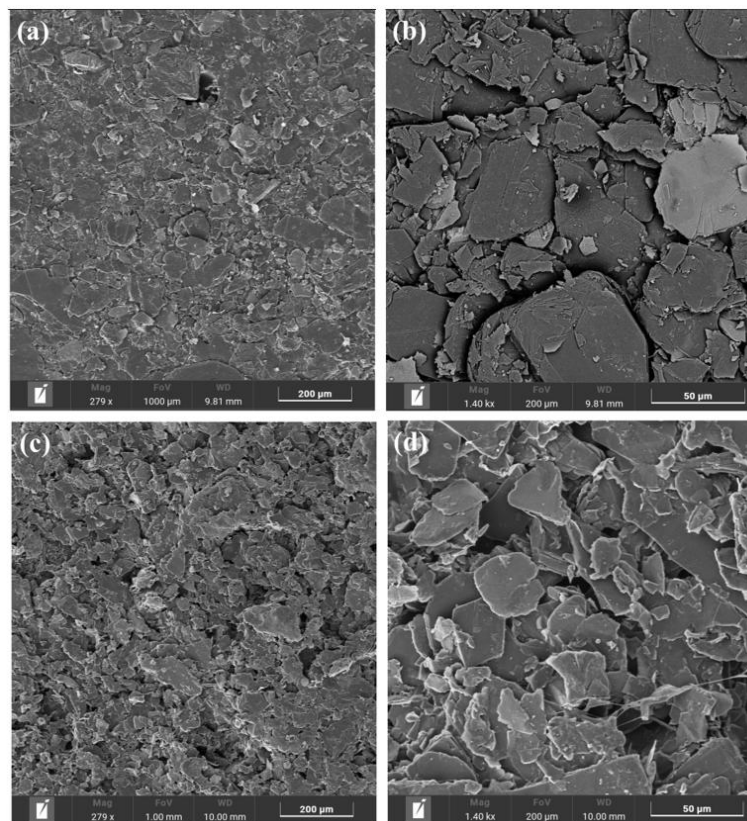
As imagens morfológicas apresentadas na Figura 42, referentes ao grafite puro e compósito grafite/PVA, foram obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV). A Figura 42a evidencia a morfologia do grafite natural, caracterizada por lamelas (placas) compactamente empilhadas. Na imagem de maior ampliação (Figura 42b), observam-se partículas de natureza lamelar com formato irregular, superfície relativamente lisa e lamelas finas, em concordância com dados reportados na literatura (Wissler, 2006) (Knuth, 2022).

As micrografias de MEV do compósito grafite/PVA, apresentadas nas Figuras 42c e 42d, evidenciam uma morfologia heterogênea, caracterizada pela presença de partículas lamelares de grafite distribuídas na matriz polimérica. Na imagem de menor ampliação (Figura 42c), observa-se uma estrutura relativamente compacta, com aglomerados de partículas. Já na imagem de maior

ampliação (Figura 42 d), é possível identificar com maior clareza as lamelas de grafite com formato irregular e superfícies predominantemente lisas, parcialmente recobertas pela matriz de PVA. Nota-se ainda a presença de regiões onde ocorre a formação de pontes interpartículas, sugerindo forte interação interfacial mediada pelo polímero. Além disso, a distribuição não totalmente uniforme do grafite indica a formação de aglomerados locais.

Dessa forma, a combinação entre a condutividade intrínseca do grafite e o caráter dielétrico do PVA resulta em um material com comportamento sinérgico, no qual há um equilíbrio mais eficiente entre condução e dissipação de energia. Associado a isso, a maior área interfacial e a possibilidade de múltiplas reflexões internas reforçam o potencial do compósito como material promissor para aplicações em absorção de ondas eletromagnéticas.

Figura 42 - MEV do grafite nas escalas (a) 200 μm e (b) 50 μm ; compósito grafite/PVA (c) 200 μm e (d) 50 μm



Fonte: Autoria própria (2026).

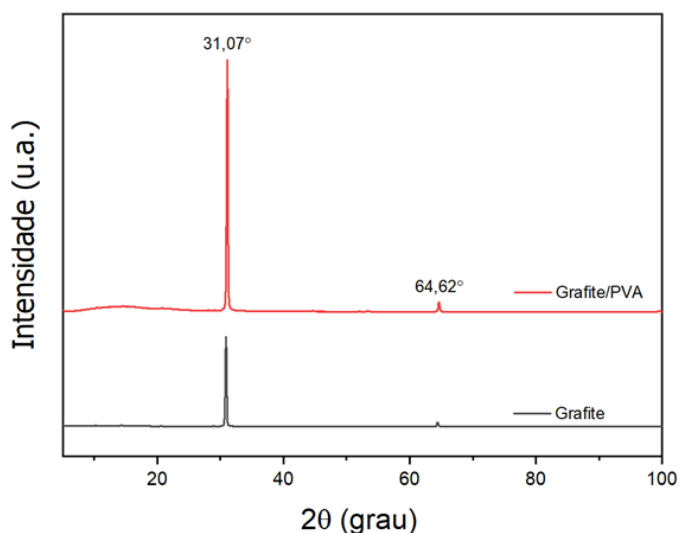
5.3.2 Difratometria de raios X (DRX)

Os difratogramas de raios X apresentados na Figura 43, referentes ao grafite em pó e ao compósito de grafite/PVA, exibiram picos intensos e bem definidos, característicos de um material

com elevado grau de cristalinidade e ordenamento estrutural de longo alcance. O pico de maior intensidade observado em $2\theta \approx 31^\circ$ foi atribuído à reflexão de primeira ordem associada ao empilhamento das camadas gráficas no plano cristalográfico (002) (Badenhorst, 2013). Além disso, um pico de menor intensidade foi identificado em $2\theta \approx 64,6^\circ$, correspondente ao plano basal (004) (Badenhorst, 2013). A ausência de picos espúrios no difratograma evidencia a alta pureza do grafite natural utilizado, sem indícios de fases oxidadas ou impurezas minerais relevantes. Os valores de 2θ observados encontram-se deslocados para maiores ângulos em relação ao valor usual reportado na literatura para a radiação de cobre ($2\theta \approx 26,5^\circ$ para o plano 002). Esse deslocamento está associado ao uso de radiação proveniente de tubo com ânodo de cobalto (Co), uma vez que o maior comprimento de onda da radiação de cobalto em relação à de cobre ($\lambda_{Co} > \lambda_{Cu}$) desloca os picos cristalográficos para maiores ângulos 2θ , conforme prevê a Lei de Bragg (Stahly, 2012).

Portanto, as semelhanças nas posições angulares (2θ) dos gráficos evidenciam que o grafite manteve sua integridade estrutural ao ser dispersado na matriz de PVA.

Figura 43 - DRX do grafite e do compósito de grafite/PVA



Fonte: Autoria própria (2026).

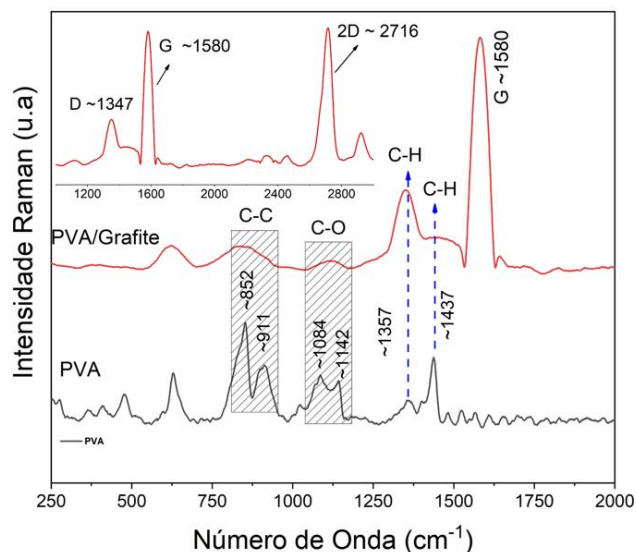
5.3.3 Espectroscopia Raman

A espectroscopia Raman foi empregada como técnica complementar ao FTIR, visando uma caracterização mais abrangente dos materiais estudados. Enquanto o FTIR permitiu identificar os grupos funcionais e as ligações químicas predominantes na matriz polimérica, o Raman mostrou-se particularmente sensível à estrutura dos materiais carbonáceos presente no grafite. A Figura 44 apresenta os espectros Raman do PVA e compósito grafite/PVA, incluindo o *insert* correspondente

ao compósito em uma faixa espectral ampliada, permitindo uma análise mais detalhada das bandas características do material.

No espectro do compósito grafite/PVA, observa-se a presença da banda G em $\sim 1580\text{ cm}^{-1}$, atribuída às vibrações dos átomos de carbono com hibridização sp^2 , característica de estruturas grafíticas, confirmando a incorporação do grafite na matriz polimérica. Além disso, a banda D em $\sim 1347\text{ cm}^{-1}$, evidenciada no *insert*, está associada à presença de defeitos estruturais e desordem no material carbonáceo. A visualização ampliada também permite identificar a banda 2D em $\sim 2716\text{ cm}^{-1}$, relacionada ao empilhamento das camadas grafíticas, reforçando a manutenção da estrutura do grafite no compósito (Thermo Scientific, 2022) (Penkov, 2020). As principais contribuições da matriz PVA ocorrem em picos próximos a 855 cm^{-1} e 910 cm^{-1} (estiramento C-C), 1128 cm^{-1} (estiramento C-O e flexão O-H), 1360 cm^{-1} (flexão C-H e O-H) e 1440 cm^{-1} (flexão C-H e O-H) (Gheluwe, 2021). Dessa forma, a análise Raman evidencia tanto as contribuições estruturais do grafite quanto as características do PVA, sugerindo que a incorporação do material carbonáceo ocorreu de maneira eficaz, com preservação de sua estrutura e possível interação com a matriz polimérica.

Figura 44 – Espectroscopia Raman do grafite e compósito de grafite/PVA



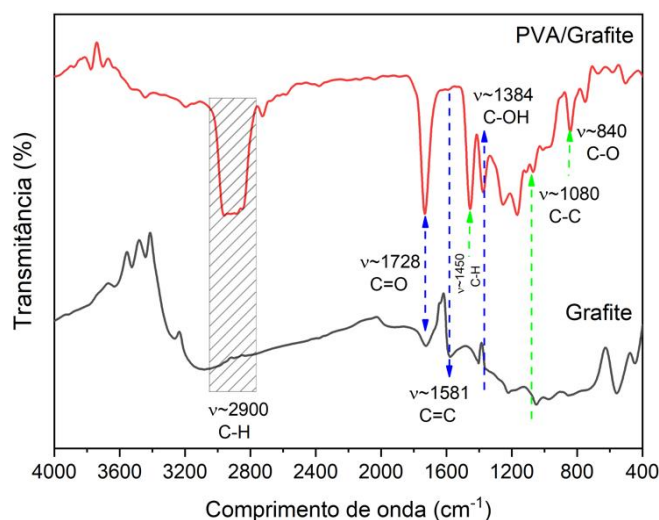
Fonte: Autoria própria (2026).

5.3.4 Espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)

A Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) foi empregada para identificar as ligações químicas e os grupos funcionais do grafite e compósito grafite/PVA aplicado ao substrato têxtil, conforme apresentado na Figura 45. O espectro do compósito de

grafite/PVA apresentou uma banda proeminente em $\nu \sim 2900 \text{ cm}^{-1}$, atribuída ao estiramento axial assimétrico do grupo metileno CH_2 da cadeia principal do PVA (Jipa, et al., 2012), possivelmente sobreposta ao modo vibracional C-H, menos intenso, presentes no espectro do grafite (Tienne, 2022). Esse aumento na intensidade também foi evidenciado na banda $\nu \sim 1728 \text{ cm}^{-1}$, atribuído ao estiramento da ligação carbonila $\text{C}=\text{O}$ do PVA (Kharazmi, et al., 2015) e grafite (Tienne, 2022). As deformações angulares no plano foram observadas nas bandas $\delta \sim 1450 \text{ cm}^{-1}$ e $\delta \sim 1384 \text{ cm}^{-1}$, sendo esta última associada ao acoplamento entre a deformação OH e o balanço do grupo CH (Kharazmi, et al., 2015) (Jipa, et al., 2012). A banda em $\nu \sim 1080 \text{ cm}^{-1}$ refere-se ao estiramento axial C-O, marcador típico das sequências amorfas do PVA (Kharazmi, et al., 2015) (Jipa, et al., 2012). Por fim, o modo vibracional em $\nu \sim 840 \text{ cm}^{-1}$ é atribuído ao estiramento do esqueleto carbônico (C-C) do polímero (Kharazmi, et al., 2015) (Jipa, et al., 2012). A manutenção e o ligeiro deslocamento dessas bandas em relação aos precursores isolados indicam que o grafite foi efetivamente incorporado à matriz polimérica, com interações de Van der Waals e possíveis ligações de hidrogênio estabilizando a interface entre o reforço e a fase contínua.

Figura 45 - FTIR do grafite e do compósito de grafite/PVA



Fonte: Autoria própria (2026)

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta Tese, foi desenvolvido um absorvedor eletromagnético têxtil flexível de baixo custo para aplicações nas tecnologias 4G e 5G, operando nas frequências de 2,5 GHz e 3,5 GHz. O absorvedor, classificado como resistivo, foi fabricado a partir de um compósito resultante da mistura de grafite em pó com uma solução de poli(álcool vinílico) (PVA) atuando como matriz ligante, aplicado sobre um substrato de tecido denim (jeans). Para avaliar os níveis de atenuação do material, foram produzidas quatro amostras com espessuras variando entre 0,96 mm e 1,05 mm. Realizaram-se medições do parâmetro de transmissão S_{21} na faixa de 1 GHz a 6 GHz utilizando um Analisador de Redes Vetorial (VNA), com ênfase na faixa de 2 GHz a 4 GHz, a qual contempla as bandas de interesse para 4G e 5G. Todas as quatro amostras apresentaram resultados significativos de atenuação. Destacou-se a Amostra 2, que obteve o melhor desempenho, com valores de S_{21} variando entre -11,89 dB (em 3,5 GHz) e -20,83 dB (em 2,14 GHz). A atenuação média registrada para essa amostra foi de -16,96 dB na faixa de 2 GHz a 2,5 GHz; -16,93 dB entre 2,5 GHz e 3 GHz; e -14,58 dB entre 3 GHz e 3,5 GHz. Nas caracterizações elétricas, os resultados de condutividade variaram entre 1,36 S/m e 7,29 S/m. A Amostra 1, com menor condutividade (1,36 S/m), destacou-se por apresentar permissividade imaginária no intervalo de $1 < \varepsilon_r'' < 1,2$, com tangente de perdas dielétricas entre $0,1 < \tan \delta < 0,15$. A caracterização estrutural e morfológica foi realizada por meio de difração de raios X (DRX), microscopia eletrônica de varredura (MEV), espectroscopia Raman e espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR). Os resultados demonstraram a eficiência do mecanismo de absorção eletromagnética por efeito Joule, aliada às vantagens de o material ser leve, fino, flexível e de baixo custo de fabricação.

6.1 Publicação

Como resultado do desenvolvimento desta pesquisa, foi publicado o seguinte artigo em periódico internacional:

CARVALHO, Paulo H. B. et al. Electromagnetic textile absorber applied to 4G and 5G bands. **Scientific Reports**, [s. l.], v. 15, p. 18768, maio 2025. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-03490-x>. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-025-03490-x>.

6.2 Trabalhos futuros

Para a continuidade desta linha de pesquisa, propõem-se os seguintes temas para trabalhos futuros:

- a) inclusão de nanoestruturas: avaliar a absorção eletromagnética do compósito com a introdução de pequenas concentrações de nanotubos de carbono ou grafeno, visando criar um efeito de ponte entre as partículas de grafite para potencializar a condutividade e as perdas dielétricas por polarização interfacial;
- b) sinergismo de materiais: investigar o uso de cerâmicas semicondutoras, como o carbeto de silício (SiC), em conjunto com o grafite, para verificar a contribuição do material cerâmico nas perdas dielétricas, combinadas às perdas ôhmicas do grafite;
- c) modelagem computacional: realizar a modelagem computacional via software de simulação eletromagnética para otimizar a espessura da camada absorvedora e refinar o casamento de impedância com o espaço livre.

REFERÊNCIAS

- Ahmad, Z. (2012). Polymeric Dielectric Materials. Em M. A. Silaghi, & M. A. Silaghi (Ed.), *Dielectric Materials* (1º ed., pp. 3-26). Rijeka, Croatia: InTech.
- ASTM. (31 de janeiro de 2026). *TABLE1 - Nominal Dimensions and Permissible Variations for Sieve Cloth and Compliance, Inspection and Calibration Test Sieves*. Fonte: newarkwire.com: <https://newarkwire.com/wp-content/uploads/ASTM-E11-22-Table-Only.pdf>
- Aswathi, M. K. (2019). EMI Shielding Fundamentals. Em M. T. aroszewski, & M. T. Jaroszewski (Ed.), *Advanced Materials for Electromagnetic Shielding: fundamentals, properties and applications* (pp. 1-8). Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons,.
- Badenhorst, H. (1 de out de 2013). Microstructure of natural graphite flakes revealed by oxidation: Limitations of XRD and Raman techniques for crystallinity estimates. *Carbon*, 66, pp. 674-690. doi:<https://doi.org/10.1016/j.carbon.2013.09.063>
- Baker-Jarvis, J. e. (2005). *Measuring the Permittivity and Permeability of Lossy Materials: Solids, Liquids, Metals, Building Materials, and Negative-Index Materials*. National Institute of Standards and Technology, U.S. Department of Commerce - Electromagnetics Division. Boulder, CO: National Institute of Standards and Technology. Fonte: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/TN/nbstechnicalnote1536.pdf>
- Basket, H. B. (14 de março de 2017). Investigation on the Dielectric Properties of Exfoliated Graphite-Silicon Carbide Nanocomposites and Their Absorbing Capability for the Microwave Radiation. *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 16, pp. 453 - 461. doi:10.1109/TNANO.2017.2682121
- Batista, A. F. (2020). Investigation of different graphite morphologies for microwave absorption at X and Ku-band frequency range. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, pp. 19064 –19073. doi:<https://doi.org/10.1007/s10854-020-04443-y>
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2021). *Ciência e Engenharia dos Materiais* (10º ed.). Rio de Janeiro: LTC.
- Canevarolo Jr, S. V. (2006). *Ciência dos Polímeros* (2 ed.). São Paulo, São Paulo: Artliber Editora Ltda.
- Chang, M., Liu, A., Zhang, F., & Liu, J. (2019). Graphene-based Absorbing Material. *International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT)*. Guangzhou. doi:<https://doi.org/10.1109/ICMMT45702.2019.8992907>
- Chen, X. e. (05 de May de 2019). A Graphite-Based Metamaterial Microwave Absorber. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 18, pp. 1016–1020. doi: 10.1109/LAWP.2019.2907780
- Christopoulos, C. (2023). *Principles and Techniques of Electromagnetic Compatibility* (3 ed.). Boca Raton: CRC Press.
- Chung, D. D. (2004). Review: Electrical applications of carbon materials. *Journal of Materials Science*, 39, 2645–2661. doi:doi.org/10.1023/B:JMSC.0000021439.18202.ea
- Clarke, B. (2007). Measurement of the dielectric properties of materials at RF and microwave frequencies. Em R. .. Collier, & R. .. Collier (Ed.), *Microwave Measurements* (pp. 409 -

- 450). London: The Institution of Engineering and Technology.
- Costanzo, S. (2012). *Microwave Materials Characterization* (1 ed.). Rijeka, Croatia: InTech. doi:<http://dx.doi.org/10.5772/2687>
- D'Aloia, A. G., Bidsorkhi, H. C., Bellis, G., & Sarto, M. S. (2022). Graphene Based Wideband Electromagnetic Absorbing Textiles at Microwave Bands. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 64(3), 710 –711. doi:doi.org/10.1109/TEMPC.2021.3
- DAIRIX. (2022). *SmartLab SE: Difratômetro multipropósito*. Acesso em 22 de Maio de 2026, disponível em Dairix: <https://dairix.com.br/products/smartlab-se-2/>
- Daniel, S. S. (2019). Shielding Efficiency Measuring Methods and Systems. Em M. J., Jaroszewski, *Advanced Materials for Electromagnetic Shielding: fundamentals, properties and applications* (pp. 61 - 88). Hoboken: John Wiley & Sons, Inc.
- Duan, Y., & Guan, H. (2017). *Microwave Absorbing Materials*. Singapura: Pan Stanford Publishing Pte. Ltd.
- Ebewele, R. O. (1996). *Polymer Science and Technology*. New York: CRC Press LLC,.
- Elmahaishi, M. F. (10 de August de 2022). A review on electromagnetic microwave absorption properties: their materials and performance. *Elsevier B.V.*(20), pp. 2188 - 2120. doi:DOI 10.1007/s10948-017-4043-3
- Gheluwe, L. V. (8 de dezembro de 2021). Confocal Raman Spectroscopic Imaging for Evaluation of Distribution of Nano-Formulated Hydrophobic Active Cosmetic Ingredients in Hydrophilic Films. *Molecules*, p. 7440. doi:<https://doi.org/10.3390/molecules26247440>.
- Ghosh, K. S. (Fev de 2021). Fabrication of N-Doped Reduced Graphite Oxide/MnCo₂O₄ Nanocomposites for Enhanced Microwave Absorption Performance. *Langmuir*, p. 2213–2226. doi:<https://dx.doi.org/10.1021/acs.langmuir.0c03641>
- Ghosh, K., & Srivastava, S. K. (5 de February de 2021). Fabrication of N-Doped Reduced Graphite Oxide/MnCo₂O₄ Nanocomposites for Enhanced Microwave Absorption Performance. *Langmuir Journal - ACS Publications*, p. 2213–2226. doi:DOI: 10.1021/acs.langmuir.0c03641
- Gilson Company, I. (31 de janeiro de 2026). *Tamanhos de Peneiras: Um Guia para Tamanhos dos EUA e Métricos*. Acesso em 2026, disponível em <https://www.globalgilson.com:https://www.globalgilson.com/blog/sieve-sizes>
- Giroto, E. M. (2002). Medidas de resistividade elétrica DC em sólidos: como efetuá-las corretamente. *Química Nova*, 25(4), pp. 639-647.
- Grafite, N. (2020). *Aplicações*. Acesso em 20 de agosto de 2024, disponível em Nacional Grafite: <https://www.grafite.com/aplicacoes>
- Gumus, E. Y. (2 de August de 2023). Investigation of the Dielectric Properties of Graphite and Carbon Black-Filled Composites as Electromagnetic. *Applied Sciences*, p. 13. doi:<https://doi.org/10.3390/app13158893>
- Gupta, T. (2018). *Carbon - The Black, the Gray and the Transparent* (1º ed.). La Mesa, California: Springer International Publishing.
- Hayt Jr, W. H., & Buck, J. A. (2013). *Eletromagnetismo* (8º ed.). Porto Alegre: Bookman.

- Ibrahim, I. R. (2020). A Study on Microwave Absorption Properties of Carbon Black and NiO.6ZnO.4Fe2O4 Nanocomposites by Tuning the Matching-Absorbing Layer Structures. *Scientific Reports*, 10(3135), 1-14. doi:<https://doi.org/10.1038/s41598-020-60107-1> (2020).
- Instituto Federal do Maranhão (IFMA). (14 de outubro de 2025). *Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)*. Acesso em 26 de abr. de 2026, disponível em Instituto Federal do Maranhão (IFMA): <https://ppgmec.ifma.edu.br/laboratorio-mev/>
- Ismail, I. e. (2019). Single and Double-Layer Microwave Absorbers of Cobalt Ferrite. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 32, 935 - 943. doi:<https://doi.org/10.1007/s10948-018-4749-x>
- Jaroszewski, M., Thomas, S., & Rane, A. V. (2021). *Industrial Carbon and Graphite Materials – Raw Materials, Production and Applications*. Weinheim, Germany: Wiley - VCH.
- Jia, Q., Wang, W., Zhao, J., Xiao, J., Lu, L., & Fan, H. (5 de July de 2017). Synthesis and characterization of TiO2/polyaniline/graphene oxide bouquet-like composites for enhanced microwave absorption performance. *Journal of Alloys and Compounds*, 710, 717-724. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.03.234>
- Jipa, I. P., Anicuta, S., Stroescu, M., Dobre, L.-M., Dobre, T., Jinga, S., & Tardei, C. (February de 2012). Potassium sorbate release from poly(vinyl alcohol)–bacterial cellulose films. *Springer Nature*, 66, pp. 138–143. doi:10.2478/s11696-011-0068-4
- Kannadhasan, S. et al. (2022). *Smart Antennas, Electromagnetic Interference and Microwave Antennas for Wireless Communications* (1 ed.). Gistrup, Denmark: River Publishers.
- Kasap, S. O. (2018). *Principles of Electronic Materials and Devices*. New York: McGraw-Hill Education.
- Keysight. (20 de Agosto de 2020). *Measurement of Dielectric Material Properties*. Acesso em 06 de Outubro de 2024, disponível em <https://www.keysight.com/us/en/assets/7018-01284/application-notes/5989-2589.pdf>
- Kharazmi, A., Faraji, N., Hussin, R. M., Saion, E., W. Mahmood, M. Y., & Behzad, K. (2015). Structural, optical, opto-thermal and thermal properties of ZnS–PVA nanofluids synthesized through a radiolytic approach. *Beilstein journal of nanotechnology*, pp. 529–536.
- Knuth, R. D. (2022). *Obtenção de Nanofolhas de Grafite Expandido (GNs) Visando à Incorporação em Eletrólito Polimérico Sólido para Potencial uso em Células Solares Sensibilizadas por Corante*. Tese. Pelotas: Universidade Federal de Pelotas.
- Kotsuka, Y. (2019). *Electromagnetic Wave Absorbers: detailed theories and applications*. New Jersey: John Wiley & Sons.
- Liu, Y. e. (25 de January de 2018). A theoretical and practical clarification on the calculation of reflection loss for microwave absorbing materials. *American Institute of Physics*. Fonte: <https://pubs.aip.org/aip/adv/article/8/1/015223/991187/A-theoretical-and-practical-clarification-on-the?searchresult=1>
- Mahanta, U. J., Gogoi, J. P., Borah, D., & Bhattacharyya, N. S. (1 de February de 2019). Dielectric characterization and microwave absorption of expanded graphite integrated

- polyaniline multiphase nanocomposites in X-band. 26, 194 - 201.
doi:10.1109/TDEI.2018.007443
- Marra, F. L. (13 de August de 2018). Electromagnetic wave absorption and structural properties of wideband absorber made of grapheneprinted glass-fibre composite. *Scientific Reports*. doi:DOI:10.1038/s41598-018-30498-3
- Mishra, V. P. (27 de April de 2017). Development of Analytical Approach to Fabricate Composites for Microwave Absorption. *IEEE Transactions on Magnetics* (, 53. doi:10.1109/TMAG.2017.2698401
- Morais, D. H. (2023). *5G NR, Wi-Fi 6, and Bluetooth LE 5: A Primer on Smartphone Wireless Technologies*. Cham: Springer. doi:<https://doi.org/10.1007/978-3-031-33812-0>
- National Instruments. (s. d.). *Introduction to Network Analyzer Measurements: Fundamentals and Background*. Austin: National Instruments. Acesso em 26 de mai de 2026, disponível em <http://www.ni.com/rf-academy>
- Patachia, S. V. (2009). *Poly (Vinyl Alcohol) [PVA]- Based Polymer Membranes*. New York: Nova Science Publishers, Inc.
- Penkov, O. V. (2020). Preparation and characterization of graphene. Em O. V. Penkov, *Tribology of Graphene: Simulation Methods, Preparation Methods, and their Application* (pp. 51-90). [S. l.]: Elsevier. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818641-1.00003-4>.
- Perez, F. R. (September de 2022). Carbon-based radar absorbing materials: A critical review. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, 3. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jsamd.2022.100454>
- Pieson, H. O. (1995). *Handbook of Carbon, Graphite, Diamond and Fullerenes Properties: Processing and Applications*. Park Ridge, New Jersey: Noyes Publications.
- Pozar, D. M. (2012). *Microwave Engineering* (4º ed.). Nova Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Raju, G. G. (2003). *Dielectrics in Electric Fields*. New York, New York: Marcel Dekker, Inc.
- ROHDE & SCHWARZ. (23 de maio de 2012). *Measurement of Dielectric Material Properties*. Acesso em 02 de maio de 2024, disponível em https://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl_downloads/dl_application/00aps_undefined/RAC-0607-0019_1_5E.pdf
- Sadiku, M. N. (2012). *Elementos de Eletromagnetismo* (5º ed.). Porto alegre: Bookman.
- Senguptaa, R. e. (2011). A review on the mechanical and electrical properties of graphite and modified graphite reinforced polymer composites. *Progress in Polymer Science*, pp. 638-670. doi:doi:10.1016/j.progpolymsci.2010.11.003
- Sivakumar, R. e. (7 de junho de 2023). *A Free Space Material Measurement*. doi:10.20944/preprints202306.0505.v1
- Smits, F. M. (3 de May de 1958). Measurement of Sheet with the Resistivities Four-Point Probe. *The Bell System Technical Journal*, 37, pp. 711 - 718. doi:10.1002/j.1538-7305.1958.tb03883.x
- Soliani EMC. (2026). *SOLIANI EMC*. Fonte: <https://www.solianiemc.com/en/>:
<https://www.solianiemc.com/wp-content/uploads/2026/01/Multilayer-microwave->

absorber-500-MHz-100-GHz.pdf

Stahly, G. P. (2012). *Advantages of a Cu vs. Co X-ray Diffraction Source*. West Lafayette: Triclinic Labs. Fonte: <http://www.tricliniclabs.com>

Thermo Scientific. (2022). *AN52252: The Raman Spectroscopy of Graphene and the Determination of Layer Thickness. Folheto Informativo*. Madison: Thermo Fisher Scientific. Fonte: <https://documents.thermofisher.com/TFS-Assets/MSD/Application-Notes/raman-spectroscopy-graphene-determination-layer-thickness-an52252.pdf>

Tienne, L. G. (30 de April de 2022). Reduced graphene oxide synthesized by a new modified Hummer's method for enhancing thermal and crystallinity properties of Poly(vinylidene fluoride). *Journal of Materials Research and Technology - Elsevier B.V.*, pp. 4871 - 4893. doi:10.1016/j.jmrt.2022.04.092

Universidade Federal do Maranhão (UFMA). ([s.d.]). *Equipamentos*. Acesso em 26 de abr. de 2026, disponível em Central Analítica Multiusuária de Química: <https://www.camq.ufma.br/infraestrutura/>

Wang, L. e. (22 de setembro de 2023). Current advances and future perspectives of MXene-based electromagnetic interference shielding materials. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 172, pp. 1-18. doi:<https://doi.org/10.1007/s42114-023-00752-y>

Wang, L., Su, S., & Wang, Y. (2022). Fe₃O₄ – Graphite Composites as a Microwave Absorber with Bimodal Microwave Absorption. 5, 17565–17575. doi:<https://doi.org/10.1021/acsanm.2c02977>

Wentworth, S. M. (2009). *Eletromagnetismo aplicado: abordagem antecipada das linhas de transmissão* (1º ed.). Porto Alegre: Bookman.

Wissler, M. (18 de April de 2006). Graphite and carbon powders for electrochemical applications. *Journal of Power Sources*, pp. 142-150.

Wu, Q. a. (19 de julho de 2019). Enhanced Wave Absorption and Mechanical properties of Cobalt Sulfide/PVDF Composite Materials. *Scientific Reports*, pp. 1-12. doi:<https://doi.org/10.1038/s41598-019-47037-3>

Xie, W., Zhu, X., Yi, S., Kuang, J., Cheng, H., Tang, W., & Deng, Y. (15 de January de 2016). Electromagnetic absorption properties of natural microcrystalline graphite. *Materials & Design*, 90, pp. 38-46. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.10.115>

Zhao, H., Jin, C., Lu, P., Xiao, Z., & Cheng, Y. (15 de November de 2022). Biomass-derived ultralight superior microwave absorber Towards X and Ku bands. *Journal of Colloid and Interface Science*, 626, pp. 13-22. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jcis.2022.06.107>