

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA AEROESPACIAL

RICARDO SCHEFFER TEIXEIRA

INFLUÊNCIA DOS SUBSTRATOS DE POLÍMERO E ALUMÍNIO NA ABSORÇÃO DE
RADIÇÃO ELETROMAGNÉTICA APRESENTADA POR FILMES FINOS DE TI

Joinville
2024

RICARDO SCHEFFER TEIXEIRA

INFLUÊNCIA DOS SUBSTRATOS DE POLÍMERO E ALUMÍNIO NA ABSORÇÃO DE
RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA APRESENTADA POR FILMES FINOS DE TI

Trabalho apresentado como requisito
para obtenção do título de bacharel
em Engenharia Aeroespacial do
Centro Tecnológico de Joinville da
Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientadora: Dra. Viviane Lilian Soethe Parucker

Joinville
2024

RICARDO SCHEFFER TEIXEIRA

INFLUÊNCIA DOS SUBSTRATOS DE POLÍMERO E ALUMÍNIO NA ABSORÇÃO DE
RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA APRESENTADA POR FILMES FINOS DE TI

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Aeroespacial, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 13 de Dezembro de 2024.

Banca Examinadora:

Orientadora: Dra. Viviane Lilian Soethe Parucker
Orientadora
Presidente

Rafael Gallina Delatorre
Membro
UFSC

Prof. Dr. Moisés Luiz Parucker
Membro
UDESC

À minha mãe e ao meu pai

Meus primeiros e melhores guias.

AGRADECIMENTOS

A realização deste Trabalho de Conclusão de Curso foi um processo desafiador e enriquecedor que não seria possível sem o apoio de várias pessoas especiais. Além disso, este TCC representa para mim todo o ciclo para a conquista do título de engenheiro aeroespacial.

Primeiramente agradeço aos meus pais, pelo amor incondicional, pelos valores que me ensinaram e por nunca duvidarem de mim, mesmo nos momentos mais desafiadores. O suporte de vocês foi essencial durante toda minha jornada acadêmica.

Aos meus irmãos, Robson e Laís, por serem meus pilares de inspiração e apoio. A parceria, as conversas e o carinho de vocês tornaram essa caminhada mais leve e especial. Vocês são exemplos de força e determinação na minha vida.

À minha orientadora, Viviane Lilian Soethe Parucker, pela paciência, orientação e disponibilidade ao longo deste projeto. Seus conselhos e ensinamentos foram fundamentais para que eu pudesse desenvolver este trabalho e crescer como pesquisador e profissional.

Ao Prof. Dr. Antônio Dourado pelas incontáveis conversas sobre o setor aeroespacial, pelas indicações e conselhos que contribuíram para minha melhoria constante.

Agradeço de coração à toda minha família, incluindo meus avós, tios, tias, primos e primas, por todo o apoio, carinho e palavras de incentivo ao longo dessa jornada. Vocês sempre estiveram ao meu lado, celebrando minhas conquistas. Sou imensamente grato por fazer parte de uma família tão unida e amorosa, que foi essencial para que eu pudesse alcançar mais esse objetivo.

A todos os meus amigos, agradeço profundamente pela amizade e companheirismo. Aos primeiros amigos que fiz ao chegar em Joinville, Luan Henrique Lourenção e Edilson Vidal, com os quais dividi bons momentos na Guasca Campeira.

Aos amigos que fiz durante a graduação Nicollas Barauce, Lucas Silva, Fúlvio Takeshi, Daniel Pretucio, Lucas Mensor e Alexandre Back pelos momentos de descontração e alegria, pelas conversas, por todos os trabalhos em equipe e pela amizade.

Agradeço aos amigos e colegas da equipe de competição Nisus, grupo que tive orgulho de fazer parte, sendo fundamental tanto para crescimento pessoal, quanto profissional. Em especial, agradeço a João Vitor Viana, Sarah Alves e Samuel Amaral, amigos que fiz na equipe e que vou levar comigo para a vida toda.

Agradeço ao time de futebol e grupo de amigos Capim Canela F.R., que transformaram

o início difícil da graduação em momentos mais leves e alegres. Meu agradecimento especial vai para Ruan Marcos Xavier, Renan Dalló Stano, João Pedro Buzzi e John Henschel Jr.

Também agradeço ao time de futebol e grupo de amigos do HV, que fizeram do meu último ano de graduação um período memorável, repleto de boas lembranças que levarei para sempre. Um agradecimento especial a Leonardo Paludetto, Yago Oliveira, Cauã Gabriel, Luís Eduardo Barbosa e Luís Otávio Barbosa.

Também sou grato à Helena Alice por me incentivar a seguir meus objetivos e por me apoiar nos momentos mais difíceis, sua companhia foi essencial.

Não posso deixar de agradecer à UFSC e aos laboratórios que tornaram este trabalho possível, especialmente ao Laboratório de Tratamento de Superfícies (LaTS) e ao Laboratório Central de Microscopia Eletrônica (LCME), pelo suporte e estrutura oferecidos ao longo do projeto. Agradeço também aos colegas Iago Souza, Keila Sant'Anna e Vitória Gaia por toda a ajuda e empenho durante a realização deste trabalho.

Um agradecimento especial ao INPE, representado pelo Prof. Maurício Baldam e seu doutorando Felipe Yamamoto, pelo apoio técnico e científico essencial. Também sou muito grato ao Laboratório de Plasma, Filmes e Superfícies (UDESC) e ao Prof. Julio César Sagás, que permitiram a confecção das amostras necessárias para a pesquisa.

Estendo minha gratidão aos professores Moisés Luiz Parucker, Diego Duarte e Cesar Edil da Costa, que ajudaram nas etapas de caracterização e análise e contribuíram muito para o desenvolvimento deste trabalho.

Quero expressar minha gratidão aos colegas da NIDEC GA em especial Rui Salvan, Vinicius Cunha, Lauro Priess, Artur Jeremias e Alexandro Cani pelos ensinamentos durante o estágio, suporte e momentos de descontração na rotina diária.

Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para minha formação e para a conclusão deste trabalho. Este Trabalho de Conclusão de Curso não é apenas um marco na minha vida acadêmica, mas também uma homenagem a todos vocês que me ajudaram a chegar até aqui.

“Vou mostrando como sou e vou sendo como posso, jogando meu corpo no mundo, andando por todos os cantos, e pela lei natural dos encontros deixo e recebo um tanto”.

Novos Baianos

“O segredo da mudança é focar toda sua energia, não em lutar contra o velho, mas sim em construir o novo”.

Sócrates

“Jamais considere seus estudos como uma obrigação, mas como uma oportunidade invejável para aprender a conhecer a beleza libertadora do intelecto para seu próprio prazer pessoal e para proveito da comunidade à qual seu futuro trabalho pertencer”.

Albert Einstein

RESUMO

Os Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética (MARE) são materiais que têm a capacidade de absorver a radiação eletromagnética incidente, através de mecanismos de perda intrínseca do material e fenômenos físicos relacionados as ondas eletromagnéticas. Esses materiais são amplamente utilizados para resolver problemas relacionados à interferência e compatibilidade eletromagnética. Sua utilização é ampla em setores como o aeroespacial, defesa militar, médico e automotivo. No setor aeroespacial, os MAREs são empregados no desenvolvimento de tecnologias de redução de detecção, tornando as aeronaves menos visíveis aos radares em faixas de frequência específicas. Na concepção de aeronaves, a utilização de materiais leves e facilmente moldáveis é crucial devido às restrições de peso e necessidade de manobrabilidade. Nesse contexto, os filmes finos metálicos se apresentam como uma solução tecnológica, uma vez que possuem baixa densidade e espessuras na ordem de dezenas de nanômetros. Neste estudo, foram avaliadas as propriedades absorvedoras de radiação eletromagnética de filmes finos de Titânio (Ti) depositados sobre dois tipos de substrato: polímero (Polietileno Tereftalato (PET)) e Alumínio (Al). Os resultados mostraram atenuações de até 95% para os filmes de Ti sobre substratos de polímero e de cerca de 40%-50% para os filmes finos de Ti depositado sobre substratos de Al. A análise também investigou a influência de características da morfologia da superfície, resistividade elétrica e espessura dos filmes na eficiência da atenuação da radiação, demonstrando que a escolha do substrato pode alterar o desempenho de absorção.

Palavras-chave: MARE. Filmes finos. Substrato. Tecnologia Furtiva.

ABSTRACT

Radar Absorbing Materials (RAMs) are materials capable of absorbing incident electromagnetic radiation through intrinsic material loss mechanisms and physical phenomena related to electromagnetic waves. These materials are widely used to solve problems related to electromagnetic interference and compatibility. Their use extends to sectors such as aerospace, military defense, medical, and automotive. In the aerospace sector, RAMs are employed in the development of detection reduction technologies, making aircraft less visible to radars within specific frequency ranges. In aircraft design, the use of lightweight and easily moldable materials is crucial due to weight restrictions and the need for maneuverability. In this context, metallic thin films are presented as a technological solution, since they have low density and thicknesses on the order of tens of nanometers. In this study, the electromagnetic radiation absorbing properties of Titanium (Ti) thin films deposited on two types of substrates: polymer (Polyethylene Terephthalate (PET)) and Aluminium (Al). The results showed attenuation levels of up to 95% for Ti films on polymer substrates and approximately 40%-50% for Ti thin films deposited on Al substrates. The analysis also investigated the influence of surface morphology characteristics, electrical resistivity, and film thickness on radiation attenuation efficiency, demonstrating that the choice of substrate can affect absorption performance.

Keywords: RAM. Thin Films. Stealth Technology.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Imagem ilustrativa da influência das ondas eletromagnéticas interagindo com dispositivos eletrônicos.	22
Figura 2 – Imagem do sistema “Leonidas” da Epirus utilizando Electromagnetic Interference (EMI) para abater drones.	24
Figura 3 – Imagem ilustrativa do SR-71.	25
Figura 4 – Imagem ilustrativa da aeronave Have Blue.	25
Figura 5 – Imagem ilustrativa da aeronave F-117A - Night Hawk.	26
Figura 6 – Imagem ilustrativa da aeronave B-2 Spirit.	27
Figura 7 – Imagem ilustrativa da aeronave B-1 B Lancer.	27
Figura 8 – Aeronaves de superioridade aérea de 5 ^o geração (a) Chengdu J-20 (China); (b) Sukhoi Su-57 (Rússia); (c) F-22 Raptor (Estados Unidos).	28
Figura 9 – Esquema representativo do Triodo Magnetron Sputtering (Triodo Magnetron Sputtering (TMS)).	32
Figura 10 – Tela de Salisbury.	38
Figura 11 – Influência da espessura do filme na rugosidade (a) Deposição de 0,06 μm ; (b) Deposição de 0,18 μm ; (c) Deposição de 0,6 μm ; (d) Deposição de 1,2 μm	39
Figura 12 – Fluxograma evidenciando as etapas utilizadas para o desenvolvimento do presente trabalho.	41
Figura 13 – Imagem evidenciando o processo de limpeza dos substratos utilizados para deposição dos filmes de Ti.	43
Figura 14 – Triodo Magnetron Sputtering (TMS) do Laboratório de Plasmas, Filmes e Superfícies, gIsUDESC - Joinville.	45
Figura 15 – Imagem evidenciando as amostras posicionadas no reator TMS antes do processo de deposição.	46
Figura 16 – Equipamento de perfilometria utilizado para medida da espessura dos filmes finos depositados.	47
Figura 17 – Imagem do Microscópio óptico da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC).	48
Figura 18 – Microscópio eletrônico de varredura (MEV), Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) - Florianópolis.	49
Figura 19 – Princípio da conservação de energia da onda eletromagnética.	50
Figura 20 – Imagem ilustrando o equipamento de Guia de Ondas:(a)Vector Network Analyzer (VNA) suas Portas de passagem de onda;(b) Adaptador; (c) Calibrador do equipamento; (d) Offset.	51

Figura 21 – Esquema das configurações das medidas feitas no equipamento Guia de Ondas. (a) Porta 1; (b) Porta 2; (c) Porta 2 invertido.	53
Figura 22 – Ilustração das configurações feitas nas medições com o equipamento Guia de Ondas.	54
Figura 23 – Esquema de funcionamento do equipamento de resistividade elétrica de quatro pontas.	55
Figura 24 – Equipamento de resistividade elétrica de quatro pontas para medidas de propriedades elétricas dos filmes finos de titânio sobre diferentes substratos evidenciando: (a) Mesa de apoio do equipamento, onde fica a amostra; (b) Gráfico de Tensão (V) x Corrente (I) obtido através das medidas.	56
Figura 25 – Imagem ilustrativa do difratômetro de Raios-X da UDESC-Joinville. .	57
Figura 26 – Imagem evidenciando o ensaio de perfilometria para medidas de espessura dos filmes finos.	58
Figura 27 – Análise de difração de raios-x para os filmes de Ti depositados sobre Al e polímero.	64
Figura 28 – Curvas de espessura pelo Skin depth (δ) nos filmes com substrato de polímero.	69
Figura 29 – Curvas de atenuação dos filmes de Ti com espessuras de 22,6 nm.	70
Figura 30 – Curvas de atenuação dos filmes de Ti com espessuras de 39 nm. .	70
Figura 31 – Curvas de frequência pelo <i>Skin depth</i> (δ) dos filmes finos de Ti depositados em substrato de polímero.	72
Figura 32 – Curvas de espessura por atenuação média dos filmes finos de Ti. .	73
Figura 33 – Curvas de Skin depth x atenuação média.	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Influência da Radar Cross Section (RCS) no valor da faixa de detecção.	29
Tabela 2 – Valores de RCS para objetos e aeronaves convencionais, bem como para aeronaves com tecnologia furtiva.	30
Tabela 3 – Comparação geral dos tipos de sputtering.	33
Tabela 4 – Parâmetros de deposição dos filmes finos de Ti (TMS).	46
Tabela 5 – Resultado das medidas da espessura dos filmes finos de Ti obtidos com as amostras de Silício (Si) pela técnica de perfilometria.	59
Tabela 6 – Microscopia óptica de filmes finos de Ti sobre substrato de polímero.	60
Tabela 7 – Microscopia óptica de filmes finos de Ti sobre substrato de Al.	61
Tabela 8 – Microscopia eletrônica de varredura (MEV) de filmes finos sobre substrato de polímero, com ampliação de 1000x.	62
Tabela 9 – Microscopia eletrônica de varredura (MEV) de filmes finos sobre substrato de alumínio (Al), com ampliação de 1000x.	63
Tabela 10 – Curvas de tensão <i>versus</i> corrente ($V - I$) de filmes finos de titânio sobre substrato de polímero, com espessuras de 22,6 nm e 39 nm.	65
Tabela 11 – Curvas de tensão <i>versus</i> corrente ($V - I$) de filmes finos de titânio sobre substrato de alumínio, com espessuras de 22,6 nm e 39 nm.	66
Tabela 12 – Valores de resistividade em quatro pontas (ρ), resistência (R), profundidade de penetração da onda (δ) para os filmes de Ti depositados sobre polímero com diferentes espessuras.	68
Tabela 13 – Valores médios de atenuação e de profundidade de penetração da onda para os filmes de Ti.	73

LISTA DE SIGLAS

Al	Alumínio
CVD	Chemical Vapour Deposition (Deposição Química a Vapor)
DRX	Difratometria de Raio X
EMC	Electromagnetic Compatibility
EMI	Electromagnetic Interference
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IoT	Internet of Things
MARE	Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
MS	Magnetron Sputtering
N	Narrow (Banda estreita)
PET	Polietileno Tereftalato
PVD	Physical Vapour Deposition (Deposição Física a Vapor)
RCS	Radar Cross Section
Si	Silício
Ti	Titânio
TMS	Triodo Magnetron Sputtering
UDESC	Universidade do Estado de Santa Catarina
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
VNA	Vector Network Analyzer
W	Wide (Banda larga)

LISTA DE SÍMBOLOS

e	espessura do filme	[nm]
δ	<i>Skin Depth</i> (espessura característica)	[m]
λ	Comprimento de onda	[m]
μ	Permeabilidade Magnética	[H/m]
μ_0	Permeabilidade Magnética do vácuo	[H/m]
ϵ	Permissividade elétrica	[F/m]
ϵ_0	Permissividade elétrica do vácuo	[F/m]
ρ	Resistividade do filme	$[\Omega \cdot m]$
ρ_s	Resistividade elétrica em folha	$[\Omega/rea]$
σ	Condutividade	$[\Omega^{-1} \cdot m^{-1}]$
f	Frequência	[Hz]
V	Tensão	[V]
I	Corrente	[A]
R	Resistência	$[\Omega]$
R_s	Resistividade de folha	$[\Omega]$
nm	Nanômetros	[nm]
s	Segundo	[s]
T	Temperatura	[K]
I_e	Intensidade	$[W/m^2]$
u	Densidade de energia	$[J/m^2]$
v	Velocidade de propagação	$[m/s]$
E	Campo elétrico	$[V/m]$
B	Campo magnético	[T]

P_t	Potencia emitida pelo radar emissor	[Watts]
P_r	Potencia atenuada pelo radar receptor	[Watts]
G_t	Ganho transmissor	[adimensional]
G_r	Ganho receptor	[adimensional]
S	Scattering parameters	[linear magnitude - adimensional]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	OBJETIVOS	19
1.1.1	Objetivo geral	19
1.1.2	Objetivos específicos	19
2	REVISÃO DA LITERATURA	20
2.1	MARE: UMA VISÃO GERAL	20
2.1.1	Aplicações civis	21
2.1.1.1	<u>Telecomunicação: 5G</u>	22
2.1.2	Aplicações militares	23
2.1.3	Radar Cross Section - (RCS)	28
2.2	FILMES FINOS	30
2.2.1	Processos de Obtenção de Filmes Finos	31
2.2.1.1	<u>Triodo Magnetron Sputtering</u>	31
2.2.2	Princípio de funcionamento de Filmes Finos Absorvedores	33
2.2.2.1	<u>Ondas eletromagnéticas</u>	33
2.2.2.2	<u>Permeabilidade magnética e Permissividade elétrica</u>	35
2.2.2.3	<u>Resistividade elétrica</u>	35
2.2.2.4	<u>Correntes Superficiais e Profundidade de Penetração</u>	36
2.2.2.5	<u>Materiais ressonantes</u>	37
2.2.3	Papel do substrato no funcionamento dos Filmes Finos	38
3	METODOLOGIA	41
3.1	PREPARAÇÃO E SELEÇÃO DOS SUBSTRATOS	41
3.2	OBTENÇÃO DAS AMOSTRAS	43
3.2.1	Triodo Magnetron Sputtering (TMS)	44
3.3	CARACTERIZAÇÃO DOS FILMES FINOS	47
3.3.1	Perfilometria	47
3.3.2	Microscopia Óptica	48
3.3.3	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	48
3.3.4	Caracterização eletromagnética utilizando equipamento de Guia de Ondas	49
3.3.5	Medida de resistividade	55
3.3.6	Difratometria de Raios-X (DRX)	57
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	58
4.1	ANÁLISE DE PERFILOMETRIA	58

4.2	ANÁLISE DE MICROSCOPIA ÓPTICA	60
4.3	ANÁLISE DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA . . .	62
4.4	DIFRAÇÃO DE RAIOS-X	63
4.5	AVALIAÇÃO DAS MEDIDAS ELÉTRICAS	65
4.6	CARACTERIZAÇÃO ELETROMAGNÉTICA	69
5	CONCLUSÕES	75
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	77
	REFERÊNCIAS	78

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de novos materiais tem sido um marco importante no progresso da civilização, marcando diferentes etapas da evolução das sociedades. Nas últimas décadas, especialmente devido à corrida espacial, a importância dos materiais no avanço tecnológico cresceu, tornando-se fundamentais para a inovação em áreas como energia, telecomunicações, saúde, defesa e meio ambiente. Por isso, estudos prospectivos sobre materiais são realizados em vários países para orientar políticas de financiamento para seu desenvolvimento científico e tecnológico (CGEE, 2010).

Uma das áreas em que os materiais avançados têm impacto significativo é na detecção e rastreamento de aeronaves, com o radar sendo a técnica mais comum utilizada para esses fins. Embora o radar seja essencial para o gerenciamento do tráfego aéreo, ele representa um desafio em operações militares ofensivas, onde a discrição é crucial. O radar funciona transmitindo ondas eletromagnéticas na atmosfera, que são refletidas pela aeronave e captadas por uma antena receptora (MOURITZ, 2012).

A quantidade de ondas refletidas por um alvo em uma determinada direção do espaço é medida pela seção reta de radar (RCS). Aeronaves com baixo valor de RCS possuem maior capacidade furtiva (NOHARA, 2003). De acordo com Mouritz (2012), é possível reduzir o RCS de um caça ao tamanho de uma ave de médio porte, utilizando um projeto adequado e aplicando tecnologias furtivas.

Para diminuir a assinatura ao radar de uma aeronave, são utilizados MARE. Esses materiais são compostos por substâncias que possuem alta capacidade de absorção de radiação eletromagnética em frequências específicas e dissipam a energia absorvida em forma de calor, dificultando a detecção do alvo por radar (SFALSIN, 2008).

Os MARE são utilizados na defesa e segurança, como revestimento de superfícies externas e internas de veículos aéreos, terrestres e meios navais militares, têm como objetivo a redução da refletividade da energia da onda eletromagnética incidente, visando evitar a detecção por radares. Além disso, materiais avançados são empregados na construção de estruturas absorvedoras de radar, como radomes, casamatas, entre outros (CGEE, 2010).

Embora os MARE sejam amplamente utilizados no setor militar, suas aplicações se estendem também à sociedade civil. Com o desenvolvimento de dispositivos eletrônicos e da comunicação sem fio, a interferência das ondas eletromagnéticas

tem se tornado um problema. Nesse contexto, os MARE são essenciais para garantir o adequado funcionamento de dispositivos eletrônicos, em aplicações científicas e industriais (SOETHE, 2009).

Existem duas classificações de MAREs: os dielétricos e os magnéticos. Para a obtenção de MAREs magnéticos, certos materiais ganham destaque como as ferritas e a ferrocarbonila (FC). Por outro lado, quando se trata de MAREs dielétricos, polímeros condutores e materiais carbonosos como o grafeno e os nanotubos de carbono, são utilizados (SOUZA, 2021).

Em determinados contextos como nas aeronaves, é desafiador utilizar os MARE convencionais devido à densidade e espessura. Isso ocorre porque esses materiais aumentam o peso da aeronave e requerem alterações no design, o que pode causar complicações. Ao considerar essa situação, pode-se observar que as principais desvantagens da aplicação de MARE convencionais em aeronaves são (SOETHE, 2009):

- Restrição na manobrabilidade e velocidade: o aumento de peso causado pelos MARE convencionais dificulta a realização de manobras e a atingir velocidades supersônicas. Isso ocorre devido às alterações no perfil aerodinâmico e ao aumento do atrito com o ar, limitando o desempenho das aeronaves;
- Limitação da carga útil: a utilização desses materiais resulta em uma redução na quantidade de carga que a aeronave pode transportar, o que pode ser problemático em termos de eficiência e flexibilidade operacional;
- Custo elevado: a fabricação e aplicação dos materiais absorvedores de radiação eletromagnética convencionais são geralmente caras. Os processos de produção e a necessidade de alterações no projeto da aeronave podem resultar em custos significativos, tornando sua utilização menos viável em termos econômicos.

Considerando os desafios mencionados para a utilização de MARE convencionais em várias plataformas é comum encontrar na literatura a busca pelo desenvolvimento de MAREs eficientes, que sejam ao mesmo tempo leves e tenham pequena espessura (COSTA et al., 2020).

Segundo Rejas (2014), filmes finos metálicos têm sido estudados como um tipo promissor de MARE, visto que com espessuras na ordem de nanômetros e baixa densidade em comparação com os materiais absorvedores convencionais, causam alterações mínimas no peso do objeto, o que é especialmente relevante para aplicações aeronáuticas, onde a redução de peso é crítica. Desse modo, os filmes finos metálicos oferecem a possibilidade de desenvolver MARE mais eficientes, mantendo a leveza e a espessura necessárias para atender às exigências da indústria aeroespacial (SOETHE et al., 2011).

Nesse cenário, e diante da relevância do entendimento dos processos de absorção dos MAREs no âmbito tecnológico, este trabalho se concentra na avaliação da capacidade absorvedora da radiação eletromagnética de filmes finos de Ti depositados pela técnica Triodo Magnetron Sputtering sobre o substrato de Al e PET, além de estudar características específicas como resistividade elétrica e espessura desses filmes.

Assim, o presente trabalho visa analisar a influência do substrato na eficiência absorvedora na Banda X (8-12 GHz), faixa de frequência amplamente utilizada por radares. Essa banda é utilizada por radares devido à sua capacidade de oferecer alta resolução espacial, sendo ideal para aplicações como controle de tráfego aéreo, mapeamento topográfico, meteorologia e sistemas de defesa (SAHOO et al., 2022).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

No presente trabalho, busca-se preparar MAREs utilizando filmes finos de Ti depositados sobre substratos isolante (polímero - PET) e condutor (alumínio) para analisar a relação entre as características resistivas, de espessura e continuidade da superfície nos processos de atenuação eletromagnética na faixa de frequência de micro-ondas (Banda X, 8-12 GHz).

1.1.2 Objetivos específicos

- Preparar filmes finos de Ti em substratos de PET e Al;
- Identificar a influência do substrato em filmes finos de Ti nos processos de atenuação em MAREs;
- Avaliar influência das características isolantes e condutoras dos substratos na absorção da radiação;
- Avaliar as propriedades morfológicas dos filmes finos de Ti sobre dois diferentes substratos;
- Avaliar os níveis de absorção obtidos com diferentes substratos, espessura e resistividade dos MAREs;
- Identificar o comportamento de absorção conforme as características de uniformidade e continuidade superficial dos filmes finos através de microscopia;

2 REVISÃO DA LITERATURA

No presente capítulo, realiza-se uma revisão bibliográfica abrangendo os principais conceitos necessários ao desenvolvimento e compreensão da pesquisa em questão.

Inicialmente, serão explorados temas relacionados à tecnologia furtiva em aeronaves e os tipos de MARE, considerando uma perspectiva histórica. Em seguida, será abordada a definição de RCS e sua conexão com a tecnologia furtiva.

Na sequência são apresentados os conceitos relacionados à tecnologia de filmes finos metálicos como absorvedores de radiação eletromagnética, detalhando o processo de deposição desses filmes e explicando o princípio físico relativo à absorção da radiação por essas estruturas de baixa espessura.

2.1 MARE: UMA VISÃO GERAL

As pesquisas iniciais sobre MARE surgiram por volta de 1930, logo após a invenção do radar. O objetivo dessas pesquisas era reduzir a seção transversal de radar (RCS) de veículos aéreos, evitando que a onda de radar retornasse completamente para a antena transmissora, e assim, impedindo a detecção da aeronave. Em 1936, foi registrada a primeira patente de um material absorvedor na Holanda. Esse absorvedor, conhecido como absorvedor de um quarto de comprimento de onda ($\lambda/4$), era um ressonador feito de negro de fumo e dióxido de titânio (SOETHE, 2009).

Existem dois tipos de MARE, classificados de acordo com sua interação com a onda. Os MARE dielétricos interagem principalmente com o campo elétrico da onda e estão relacionados às suas propriedades dielétricas, como a permissividade (ϵ). Materiais dielétricos, como o carvão de silício, são usados como aditivos, mas muitos MARE dielétricos são compostos por carbono, como o negro de fumo, grafeno ou nanotubo de carbono (SFALSIN, 2008).

Além disso, MARE magnéticos são amplamente empregados e interagem tanto com o campo elétrico quanto com o campo magnético da onda, relacionados à sua permeabilidade (μ). Eles são preparados por dispersão de aditivos eletromagnéticos, como as ferritas. Embora os MARE magnéticos apresentem ótimas características absorvedoras, eles têm uma densidade elevada e podem oxidar, afetando sua eficiência. Isso é especialmente preocupante em aeronaves supersônicas, onde pode ocorrer superaquecimento das superfícies (SOUZA, 2021).

A interação de uma onda eletromagnética com um MARE, seja ele dielétrico ou

magnético, promove processos internos que transformam a energia da onda em calor. Esses processos diferem para materiais dielétricos e magnéticos, mas o resultado em ambos os casos é a geração de calor (NOHARA, 2003).

A atenuação produzida por um material absorvedor varia conforme a faixa de frequência em que é aplicada. Os MARE são classificados como banda estreita (tipo Narrow (Banda estreita) (N)) ou banda larga (tipo Wide (Banda larga) (W)). Os absorvedores de banda estreita apresentam comportamento ressonante devido à interferência entre as ondas incidentes e refletidas, sendo eficazes em faixas de frequência específicas. Por outro lado, os absorvedores de banda larga oferecem atenuação em uma ampla faixa de frequências (SOETHE, 2009).

A obtenção da atenuação da onda eletromagnética é alcançada, basicamente, por meio de três técnicas, sendo elas: cancelamento de fase da onda incidente, dispersão em várias direções e o uso de materiais com perdas eletromagnéticas adequadas à faixa de frequência desejada (MARINHO, 2009).

No Brasil, as pesquisas e desenvolvimentos relacionados aos MARE ainda são consideradas recentes. Essa constatação é evidenciada pela escassez de material bibliográfico nacional disponível sobre o assunto, tanto em formato impresso quanto eletrônico (REJAS, 2014).

A escolha do Ti como MARE para o trabalho em questão foi feita baseada no histórico de trabalhos existentes, os quais evidenciam a sua eficiência absorvedora. Muitos estudos sobre Ti buscam mapear quais características influenciam de maneira mais eficiente na absorção da radiação, assim como nesta pesquisa, que avaliará a influência do substrato na absorção de filmes finos de Ti depositados sobre amostras de alumínio e polímero (SOETHE et al., 2011).

2.1.1 Aplicações civis

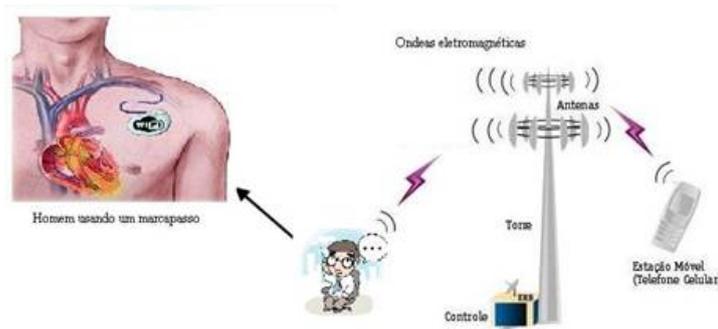
Os MAREs têm diversas aplicações no setor civil, abrangendo áreas como telecomunicações, medicina, indústria automotiva, eletrônica e eletrodomésticos (RIVERA, 2022).

Na telecomunicação, são utilizados para revestir aparelhos celulares e antenas de radiotransmissão, melhorando a transmissão de dados. Na medicina controlam a interferência, garantindo a precisão de equipamentos, sendo, por exemplo, aplicados em marcapassos. Na eletrônica, revestem câmaras anecoicas sendo utilizados em controles industriais. Também são empregados na blindagem eletromagnética de eletrodomésticos e no controle de interferências (SILVA et al., 2009).

Qualquer dispositivo eletrônico que exposto à radiação eletromagnética e que apresente comportamento anômalo, por conta de incompatibilidade e interferências

eletromagnéticas, requer o uso de MAREs para garantir seu funcionamento. Alguns aparelhos são afetados por problemas elétricos, eletrônicos e até mesmo uma mudança na programação de um marcapasso. Na Figura 1 são apresentadas imagens ilustrativas destes dispositivos que fazem uso de MARE.

Figura 1 – Imagem ilustrativa da influência das ondas eletromagnéticas interagindo com dispositivos eletrônicos.



Fonte: Marinho (2009, p. 11).

2.1.1.1 Telecomunicação: 5G

Em menos de um século, a tecnologia de comunicação sem fio evoluiu de sua primeira geração para a atual quinta geração (5G), com a sexta geração (6G) já em desenvolvimento. Esses avanços trouxeram transmissões mais rápidas, menor latência e o suporte a inovações como a Internet of Things (IoT). No entanto, com o aumento do número de dispositivos eletrônicos, especialmente na era do IoT, a probabilidade de interferências eletromagnéticas (EMI) cresceu consideravelmente (WANG; LI, 2024).

Segundo Tong (2022), é fundamental que dispositivos eletrônicos, como smartphones e sistemas utilizados nas indústrias automotiva, médica e aeroespacial, atendam aos rigorosos padrões de Electromagnetic Compatibility (EMC). Isso garante que eles não sejam afetados por interferências de ondas externas, nem causem problemas em outros equipamentos ou riscos à saúde humana, e para mitigar as EMI, uma estratégia é o uso de MARE.

Atualmente, existem duas abordagens principais: a blindagem compartimental e a blindagem conformal, que podem ser aplicadas de forma independente ou combinada para um sistema mais abrangente de EMI (TONG, 2022). Contudo, com o avanço da miniaturização dos componentes eletrônicos e o aumento das EMIs, devido ao uso de sinais cada vez mais intensos, faz-se necessária a utilização de MARE cada vez mais finos e leves para estas blindagens.

Dessa forma, à medida que as aplicações das comunicações 5G e 6G continuam a se expandir, a importância dos MARE torna-se cada vez mais evidente,

sendo os filmes finos uma alternativa capaz de atender estas demandas.

De forma geral, os MAREs possuem potencial de melhorar significativamente a confiabilidade de dispositivos de comunicação sem fio, como smartphones e sistemas de radar em veículos autônomos (SITE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA, 2024).

2.1.2 Aplicações militares

O homem sempre buscou escapar do inimigo mantendo-se discreto, com uma “baixa assinatura”. No passado, isso significava se esconder para evitar ser detectado visualmente, ou seja, tornar-se invisível na faixa do espectro visível. Desde então, a busca pela invisibilidade aos olhos adversários se tornou um objetivo constante.

Com o avanço da tecnologia, os sistemas de radar foram desenvolvidos, permitindo uma exploração mais ampla do espectro eletromagnético pela humanidade. Como os comprimentos de onda da faixa da Banda X (8-12 GHz) tem uma boa combinação entre alcance, precisão e resistência à interferências atmosféricas, os radares modernos utilizam essa faixa por ser uma escolha versátil. Assim, no âmbito militar, os setores de defesa têm se empenhado em criar sistemas capazes de minimizar a detecção de seus equipamentos, tornando-os praticamente “invisíveis” aos inimigos. Essa busca pela invisibilidade visa garantir uma vantagem estratégica, dificultando a identificação e o rastreamento preciso dos recursos utilizados nas operações militares (SAHOO et al., 2022).

Nas guerras modernas, drones são utilizados em larga escala, como pela Rússia na guerra contra a Ucrânia e pela China em Taiwan. Até então, a principal defesa contra eles eram armas a laser, que fazem disparos direcionados. No entanto, as armas de micro-ondas de alta potência, como o sistema “Leonidas” da Epirus (Figura 2), que oferece uma nova solução para enfrentar os drones. Elas emitem uma interferência eletromagnética que desativa a eletrônica de múltiplos drones simultaneamente, cobrindo uma área maior, conseguindo proteger tropas de forma mais eficaz contra ataques de drones e mísseis (KELLER, 2024).

Figura 2 – Imagem do sistema “Leonidas” da Epirus utilizando EMI para abater drones.



Disponível em: <https://www.epirusinc.com/electronic-warfare>.
Acesso em: 20 agosto de 2024.

Zikidis et al. (2014) apresentam uma breve perspectiva histórica do desenvolvimento da tecnologia furtiva em aeronaves, que é descrita na sequência.

Durante a década de 60, o físico russo Petr Ufimtsev estudou o espalhamento de ondas eletromagnéticas e formulou o que é conhecido hoje como a Teoria Física da Difração. Seu trabalho não foi considerado sigiloso pela União Soviética e foi publicado. A principal conclusão de seu trabalho foi que o retorno do radar está relacionado à configuração da borda de um objeto e não ao seu tamanho (ZIKIDIS et al., 2014).

Até os anos 1970, as três principais aeronaves que apresentaram características furtivas foram: a Avro Vulcan britânica e duas aeronaves americanas fabricadas pela Lockheed, a U-2 Dragon Lady e a notável SR-71 Blackbird, que pode ser vista na Figura 3. Embora tenham sido feitos esforços no desenvolvimento de tecnologia *stealth* nessas aeronaves, elas ainda eram facilmente detectáveis pelos radares em uso naquela época.

Figura 3 – Imagem ilustrativa do SR-71.



Disponível em: <https://www.cavok.com.br/conheca-algumas-curiosidades-do-sr-71-blackbird-o-aviao-espiao-definitivo-da-guerra-fria>.
Acesso em: 12 junho de 2023.

Com os avanços na tecnologia computacional durante os anos 70, engenheiros dos Estados Unidos aplicaram os conceitos desenvolvidos por Ufimtsev e realizaram simulações computacionais. Em 1975, a Lockheed construiu duas aeronaves experimentais chamadas Have Blue, sendo possível ver uma imagem ilustrativa na Figura 4. Infelizmente, essas aeronaves foram perdidas em um acidente devido a um incêndio nos motores durante o voo. No entanto, o programa foi considerado um sucesso, ao demonstrar que era possível utilizar a tecnologia *stealth* em aeronaves (ZIKIDIS et al., 2014).

Figura 4 – Imagem ilustrativa da aeronave Have Blue.



Disponível em: https://www.militaryfactory.com/aircraft/detail.php?aircraft_id=1857#images.
Acesso em: 10 junho de 2023.

Após o sucesso do projeto Have Blue, os Estados Unidos contrataram a Lockheed em 1978 para desenvolver uma aeronave furtiva chamada F-117A, conforme ilustrado na Figura 5. O F-117A fez seu primeiro voo em 1981 e só alcançou sua

capacidade operacional total em 1983, com um total de 64 (sessenta e quatro) aeronaves construídas. O F-117A desempenhou um papel crucial em praticamente todos os conflitos envolvendo os Estados Unidos até sua aposentadoria em 2008. Durante esse período, houve apenas um registro de uma aeronave abatida durante a guerra do Kosovo, devido ao uso de um radar modificado com maior capacidade de detecção pelo Batalhão de Defesa Aérea Sérvio (ZIKIDIS et al., 2014).

Figura 5 – Imagem ilustrativa da aeronave F-117A - Night Hawk.



Disponível em: http://www.military-today.com/aircraft/lockheed_f117_nighthawk.htm.
Acesso em: 12 junho de 2023.

Após a produção do F-117A, que era uma aeronave de curto alcance, os Estados Unidos perceberam a necessidade de investir no desenvolvimento de um bombardeiro de longo alcance. Como resultado, foi criado o bombardeiro furtivo Northrop B-2 Spirit, apresentado na Figura 6. O B-2 é um bombardeiro subsônico de quatro motores, e que consegue alcançar qualquer lugar do mundo, graças à capacidade de reabastecimento em voo. Os princípios de tecnologia furtiva utilizados no B-2 foram posteriormente aplicados no Rockwell B1, resultando no desenvolvimento do bombardeiro supersônico B1-B Lancer, o qual pode ser visto na Figura 7.

Figura 6 – Imagem ilustrativa da aeronave B-2 Spirit.



Disponível em: <https://militarymachine.com/b-2-spirit/>.
Acesso em: 12 junho de 2023.

Figura 7 – Imagem ilustrativa da aeronave B-1 B Lancer.



Disponível em: <https://militarymachine.com/b-1b-lancer/>.
Acesso em: 12 junho de 2023.

As aeronaves F-117A, B-2 e B-1B marcaram o início do desenvolvimento das tecnologias furtivas, apresentando resultados notáveis. A partir dessas, surgiram várias outras aeronaves furtivas, não apenas nos Estados Unidos, mas também em países como Rússia, China e outros, como ilustrado na Figura 8. Esses avanços representaram um marco significativo na tecnologia aeroespacial, estabelecendo um novo padrão para a evasão e a redução da detecção por radares inimigos em aeronaves de superioridade aérea (ZIKIDIS et al., 2014).

Figura 8 – Aeronaves de superioridade aérea de 5^o geração (a) Chengdu J-20 (China); (b) Sukhoi Su-57 (Rússia); (c) F-22 Raptor (Estados Unidos).



(a) Chengdu J-20 (China)



(b) Sukhoi Su-57 (Rússia)



(c) F-22 Raptor (Estados Unidos)

Disponível em: <https://www.warfareblog.com.br/>.
Acesso em: 12 julho de 2024.

2.1.3 Radar Cross Section - (RCS)

De acordo com Knott et al. (2004), a seção transversal de radar (RCS) é uma medida da potência de espalhamento em uma direção específica quando um objeto é exposto a uma onda incidente. O RCS é ajustado pela densidade de potência da onda incidente no objeto, o que significa que não é influenciada pela distância entre o objeto e a fonte da radiação incidente.

Em outras palavras, o RCS fornece uma medida padronizada da capacidade de um objeto em espalhar a energia do radar. Quanto maior o valor de RCS, mais detectável é um objeto (ZIKIDIS et al., 2014). Sendo assim, uma aeronave considerada furtiva é aquela que apresenta uma baixa seção transversal de radar.

É possível compreender a importância da redução de RCS na aplicação da tecnologia furtiva por meio da equação de radar (Equação 1), conforme demonstrado por Cadirci (2009):

$$P_t = \frac{P_r \cdot G_t \cdot G_r \cdot \sigma \cdot \lambda^2}{(4\pi)^3 \cdot R^4} \quad (1)$$

Onde:

- P_r → Potência atenuada pelo radar receptor [watts];
- P_t → Potência transmitida do radar emissor [watts];
- G_r → Ganho do receptor;
- G_t → Ganho do transmissor;
- σ → RCS [m^2];
- λ → Comprimento de onda [m];
- R → Faixa de detecção [m].

Como a faixa de detecção é um fator crítico para a capacidade furtiva, a equação de radar pode ser rearranjada para a Equação 2:

$$R = \left[\frac{P_r \cdot G_t \cdot G_r \cdot \sigma \cdot \lambda^2}{(4\pi)^3 \cdot P_t} \right]^{1/4} \quad (2)$$

A Equação 2 mostra que a faixa de detecção, ou seja, a distância entre o radar e o alvo, varia de acordo com a raiz quarta do RCS. Além disso, o valor do RCS é o único fator que pode ser modificado para reduzir o sinal de detecção, já que os demais parâmetros são ajustados pelo inimigo (KNOTT et al., 2004).

Conforme demonstrado por Cadirci (2009), uma simulação foi realizada para analisar a influência da variação de RCS no valor da faixa de detecção, apresentado na Tabela 1. Esses resultados ilustram como as alterações no RCS podem ter um impacto direto na capacidade de detecção de uma aeronave.

Tabela 1 – Influência da RCS no valor da faixa de detecção.

RCS [m^2]	Faixa de detecção [km]	Redução da faixa de detecção [%]
1000	508,92	-
100	286,19	43,77
81	271,50	46,65
10	160,93	68,38
5	135,33	73,41
1	90,49	82,22

Fonte: Adaptado de Cadirci (2009) e Rejas (2014).

Conforme os dados da Tabela 1, pode-se observar que objetos com valores menores de RCS são mais difíceis de se detectar. Para complementar, a Tabela 2 oferece uma comparação dos valores de RCS entre objetos e aeronaves convencionais, bem como aeronaves conhecidas por possuir tecnologia furtiva.

Tabela 2 – Valores de RCS para objetos e aeronaves convencionais, bem como para aeronaves com tecnologia furtiva.

Objeto	RCS [m^2]
Jato jumbo	100
C-130 Hercules	80
Bombardeiro B-47	40
F-15 Eagle	25
Bombardeiro B-1B	1
Homem	1
B-1B Lancer	0,75
B-2 Spirit	0,1
F-117A	0,025
Pássaro	0,01
F-22 Raptor	0,0005
Inseto	0,00001

Fonte: Adaptado de Zikidis et al. (2014) e Rejas (2014).

De acordo com Knott et al. (2004), existem quatro métodos para diminuir o RCS: alterar a forma ou geometria do objeto, usar MARE, aplicar cancelamento passivo e aplicar cancelamento ativo. Neste trabalho em particular, há um foco na utilização de MARE baseados em filmes finos metálicos como estratégia para reduzir a detecção.

2.2 FILMES FINOS

MARE convencionais possuem alta densidade e espessura, limitando sua aplicação em certos cenários. No entanto, os filmes finos oferecem uma vantagem significativa como material absorvedor devido aos processos quânticos e intrínsecos de interação entre a onda eletromagnética incidente e a estrutura do filme (SAVILLE, 2005).

Como resultado, enquanto os materiais dielétricos convencionais, como o negro de fumo, requerem espessuras da ordem de centímetros para alcançar atenuações de cerca de 50%, e os absorvedores com perdas magnéticas necessitam de alguns poucos milímetros, os filmes finos metálicos podem alcançar níveis semelhantes de

atenuação com recobrimentos de espessuras da ordem de nanômetros (nm) (SOETHE, 2009).

2.2.1 Processos de Obtenção de Filmes Finos

Tradicionalmente, existem dois processos de obtenção de filmes finos: Physical Vapour Deposition (Deposição Física a Vapor) (PVD) e Chemical Vapour Deposition (Deposição Química a Vapor) (CVD) (SMITH, 1995).

No processo PVD, os elementos necessários para formar o filme são removidos fisicamente de uma fonte, seja por evaporação (aumento de temperatura) ou pelo impacto de íons (sputtering). Já nos processos CVD, o filme é formado a partir de reações químicas que ocorrem na superfície do substrato. Essas diferenças nos mecanismos de deposição têm implicações significativas nas propriedades e características dos filmes produzidos (OHRING, 2002).

Além das diferenças nos princípios de formação do revestimento, os métodos PVD e CVD também se distinguem em termos de aspectos técnicos e custos associados à aquisição e manutenção dos equipamentos. Embora os processos CVD envolvam um controle mais complexo dos parâmetros de tratamento, geralmente, requerem o uso de equipamentos mais simples e econômicos em comparação aos processos PVD (SOETHE, 2009).

De acordo com Smith (1995), o processo PVD pode ser utilizado para obter espécies vaporizadas por meio de processos como evaporação térmica, também conhecido como processo de evaporação a vácuo, ou através do bombardeamento de um substrato com partículas energéticas, sendo este segundo o utilizado no presente trabalho. Nesse processo, o filme é formado pela condensação das moléculas do material alvo sobre a superfície do substrato.

2.2.1.1 Triodo Magnetron Sputtering

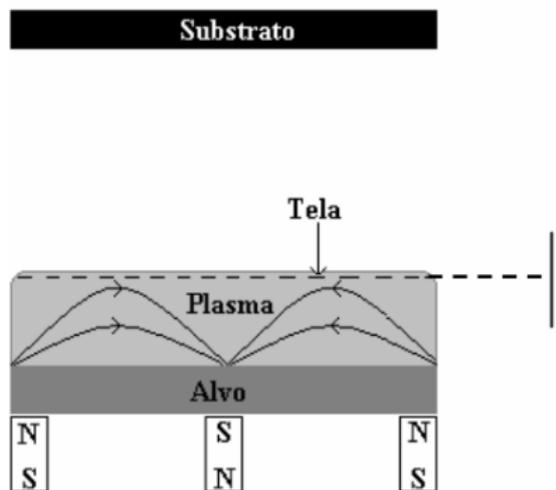
O processo de sputtering consiste em um método PVD a plasma. Tal fenômeno foi primeiramente observado no século XIX e a sua utilização para obtenção de filmes é datada de 1877 (OHRING, 2002).

Nesse processo, o material-alvo atua como cátodo, enquanto o substrato desempenha o papel de ânodo. Ambos são colocados em uma câmara contendo um gás inerte. A aplicação de uma tensão no sistema provoca a aceleração de elétrons, gerando uma corrente elétrica. Essa corrente resulta na ionização do gás inerte através das colisões entre átomos. Dessa forma, ocorre a criação de um fluxo de corrente elétrica que circula ao redor do substrato e do material-alvo, promovendo a transferência do material do alvo para o substrato (SMITH, 1995).

A obtenção de filmes finos por diferentes métodos influencia as propriedades dos recobrimentos de forma específica. Existem vários fatores que estão relacionados às propriedades dos filmes, como a energia das partículas ao atingir o substrato, a pressão do gás utilizado, a concentração de gases residuais na câmara e a presença de contaminantes na amostra (QUADROS, 2014).

O TMS é uma evolução do Sputtering Convencional e do Magnetron Sputtering (MS). No TMS há uma alteração na geometria do sistema do MS através da inserção de uma tela de aço austenítico em frente ao alvo (cátodo) e a adição de um terceiro eletrodo, para melhorar o controle sobre o plasma (SOETHE, 2009), como pode ser esquematicamente observado na Figura 9.

Figura 9 – Esquema representativo do Triodo Magnetron Sputtering (TMS).



Fonte: Soethe (2009, p. 61).

A tela de aço no sistema TMS tem a função de recolher elétrons frios, com baixa energia cinética, que não contribuem de forma significativa para o processo de ionização. Isso resulta em um plasma mais homogêneo e concentrado na região entre a tela e o alvo, aumentando a eficiência e a estabilidade do sistema, além de reduzir a tensão de ignição necessária para iniciar a descarga (FONTANA; MUZART, 1998).

Sendo assim, apesar de sua maior complexidade e custo operacional devido à necessidade de maior controle, o TMS oferece um ajuste mais preciso das propriedades do filme depositado, permitindo, por exemplo, a utilização de substratos sensíveis ao calor, como os polímeros (SOETHE, 2004). Na Tabela 3 são apresentados características do sistema de *sputtering* conhecidos e utilizados na indústria e em centros de pesquisa.

Tabela 3 – Comparação geral dos tipos de sputtering.

Tipo de Deposição	Eficiência	Taxa de Deposição	Controle dos Parâmetros	Complexidade
Sputtering Convencional	Baixa	Lenta	Baixo	Simple
Magnetron Sputtering	Alta	Rápida	Médio	Moderada
Triodo Magnetron Sputtering	Muito Alta	Ajustável	Alto	Alta

Fonte: Adaptado de (BOSSCHER et al., 2002). Uniformity control in sputter deposition processes. 2002. Adaptado.

2.2.2 Princípio de funcionamento de Filmes Finos Absorvedores

Para entendermos como as ondas eletromagnéticas interagem com os materiais e os mecanismos de perda envolvidos nesse processo, devemos analisar diversas propriedades elétricas e fenômenos que acontecem na superfície dos filmes finos quando incididos por uma radiação eletromagnética (PEREIRA, 2007).

2.2.2.1 Ondas eletromagnéticas

A intensidade (I) de uma onda eletromagnética é uma medida da potência transportada pela onda por unidade de área perpendicular à direção de propagação. Em termos físicos, ela representa a taxa de transferência de energia através de uma superfície. A intensidade de uma onda plana e harmônica é diretamente proporcional à densidade de energia (u) e à velocidade com que a onda se propaga (v), como mostra a Equação 3 (HALLIDAY, 2008a):

$$I = u \cdot v \quad (3)$$

No caso de ondas eletromagnéticas no vácuo, onde a velocidade da onda é igual à velocidade da luz (c), ficamos com a Equação 4:

$$I = c \cdot u \quad (4)$$

A densidade de energia u de uma onda eletromagnética é derivada da energia armazenada nos campos elétrico (E) e magnético (B) da onda. A fórmula para a densidade de energia é obtida a partir das equações de Maxwell e das propriedades dos campos elétrico e magnético, resultando na Equação 5.

$$u = \frac{\epsilon_0}{2} E^2 + \frac{1}{2\mu_0} B^2 \quad (5)$$

Substituindo a densidade de energia (u), Equação 5, na Equação 4, chegamos à Equação 6:

$$I = c \left(\frac{\epsilon_0}{2} E^2 + \frac{1}{2\mu_0} B^2 \right) \quad (6)$$

Segundo Halliday (2008a), para ondas eletromagnéticas planas no vácuo, os campos, elétrico (E) e magnético (B) são perpendiculares entre si e à direção de propagação da onda, oscilando em fase. A amplitude do campo magnético está relacionada à amplitude do campo elétrico pela velocidade da luz (c) através da Equação 7:

$$B = \frac{E}{c} \quad (7)$$

Essa relação é derivada das equações de Maxwell e reflete o acoplamento entre os campos elétrico e magnético em uma onda eletromagnética. Substituindo essa relação na equação da densidade de energia chegamos a Equação 8:

$$u = \frac{\epsilon_0}{2} E^2 + \frac{1}{2\mu_0} \left(\frac{E}{c} \right)^2 \quad (8)$$

E utilizando a relação fundamental $\epsilon_0\mu_0 = 1/c^2$, o termo magnético se simplifica, resultando na Equação 9:

$$u = \epsilon_0 E^2 \quad (9)$$

Logo, toda a densidade de energia pode ser expressa em função do campo elétrico, e substituindo a Equação 9 na Equação 4 da intensidade, chegamos à Equação 10 (HALLIDAY, 2008a):

$$I = c \cdot \epsilon_0 E^2 \quad (10)$$

De forma semelhante, usando a relação $B = E/c$, a intensidade também pode ser expressa em função de B , como mostra a Equação 11:

$$I = \frac{c}{\mu_0} B^2 \quad (11)$$

Portanto, essas equações mostram que a intensidade de uma onda eletromagnética é diretamente proporcional ao quadrado da amplitude do campo elétrico (E) ou do campo magnético (B), como pode ser observado na Equação 12:

$$I \propto E^2 \quad \text{ou} \quad I \propto B^2 \quad (12)$$

2.2.2.2 Permeabilidade magnética e Permissividade elétrica

Os parâmetros de permissividade elétrica relativa (ϵ_r) (Equação 13) e permeabilidade magnética relativa (μ_r) (Equação 14) estão diretamente ligados às propriedades intrínsecas do material e desempenham um papel crucial no comportamento do material quando exposto à radiação eletromagnética (SAVILLE, 2005).

Como já mencionado anteriormente, a permissividade elétrica reflete a interação do material com o campo elétrico, enquanto a permeabilidade magnética está relacionada ao campo magnético. Os termos ϵ_r' e μ_r' estão associados ao armazenamento de energia dos campos elétrico e magnético, respectivamente, enquanto os termos ϵ_r'' e μ_r'' estão relacionados às perdas de energia (NOHARA, 2003).

$$\epsilon_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' \quad (13)$$

$$\mu_r = \mu_r' - j\mu_r'' \quad (14)$$

Por meio destes parâmetros, é possível calcular os valores de refletividade do filme, sendo este um aspecto importante na determinação da eficiência de um MARE de filme fino (PEREIRA, 2007).

2.2.2.3 Resistividade elétrica

Os parâmetros que influenciam as propriedades superficiais dos filmes finos são fundamentais, pois impactam diretamente nas suas características elétricas e nos processos de atenuação eletromagnética, um dos focos deste estudo. Fatores como a presença de impurezas, o nível de vácuo, a razão de deposição e a morfologia da superfície do recobrimento têm influência direta nas propriedades elétricas. (SMITH, 1995)

A resistividade é uma característica fundamental na análise das propriedades elétricas dos materiais, sendo inversamente proporcional à condutividade, como mostra a Equação 15 (HALLIDAY, 2008b).

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \quad (15)$$

Segundo Owens e Poole (2002), de maneira semelhante, na Equação 16 temos a relação entre a resistência de uma dada superfície de um condutor (R_s), a condutividade (σ) e a profundidade de penetração (δ).

$$R_s = \frac{1}{\delta\sigma} \quad (16)$$

A resistividade é uma propriedade elétrica fundamental dos materiais. Em geral, os metais possuem alta condutividade elétrica, na ordem de $10^7 \text{ Ohm}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$, principalmente devido ao grande número de elétrons livres em sua estrutura (SMITH, 1995).

Nos filmes finos, a resistividade depende da estrutura e das dimensões do recobrimento. Geralmente, filmes finos metálicos com espessura inferior a $1\mu\text{m}$ apresentam uma resistividade maior do que a observada no material em sua forma volumétrica (SOETHE, 2009).

Defeitos e impurezas cristalinas atuam como centros de espalhamento para os elétrons livres nos materiais, e o aumento dessas imperfeições eleva a resistividade, reduzindo a condutividade do material. Em filmes finos, estudos recentes mostram que a resistividade é inversamente proporcional à espessura e ao tamanho dos grãos, já que os contornos de grão também funcionam como pontos de espalhamento para os elétrons, intensificando o efeito resistivo (SMITH, 1995).

2.2.2.4 Correntes Superficiais e Profundidade de Penetração

Através das propriedades elétricas dos filmes finos, podemos entender os mecanismos de atenuação, nos quais a energia incidente é transformada em calor por meio do efeito Joule. Esse fenômeno ocorre devido à geração de correntes superficiais induzidas pela taxa de variação do fluxo magnético que incide em um material condutor, conforme estabelecido pela terceira lei de Maxwell (CHENG, 2014). Esse fenômeno elétrico é conhecido como indução de correntes de Foucault, em referência ao físico francês Leon Foucault, que o descobriu em 1851 (NUSENVEIG, 2015).

As correntes de Foucault, atenuam os campos elétrico e magnético, resultando em perdas ôhmicas e dissipação de energia onde são induzidas (CHENG, 2014). A profundidade na qual estas correntes penetram na superfície é denominada de skin depth (δ - camada pelicular). Essa propriedade pode ser calculada por meio da Equação 17 (SOETHE, 2009).

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \sigma}} \quad (17)$$

Sendo:

- $f \rightarrow$ Frequência;
- $\sigma \rightarrow$ Condutividade;
- $\mu \rightarrow$ Permeabilidade.

Segundo Soethe (2009), para ocorrer a atenuação de energia e a conversão da energia cinética em energia térmica, é necessário haver uma estrutura que aumente a resistência à passagem da corrente elétrica no material. Nesse sentido, a presença de defeitos ou impurezas no revestimento contribui para esse um efeito de dispersão, resultando em níveis mais elevados de atenuação. Esses mecanismos de espalhamento são responsáveis por transformar a energia cinética atômica em calor, promovendo a dissipação da energia incidente.

2.2.2.5 *Materiais ressonantes*

Essencialmente, existem três técnicas de construção de absorvedores de radiação eletromagnética, baseadas em: cancelamento de fases da onda eletromagnética incidente, espalhamento da onda eletromagnética incidente em direções diferentes, e utilização de materiais com perdas magnéticas e dielétricas intrínsecas na faixa de frequências de interesse, os quais convertem a energia da onda em calor (CGEE, 2010). Entre essas abordagens, os materiais ressonantes destacam-se por utilizarem o cancelamento de fase como o principal mecanismo de atenuação.

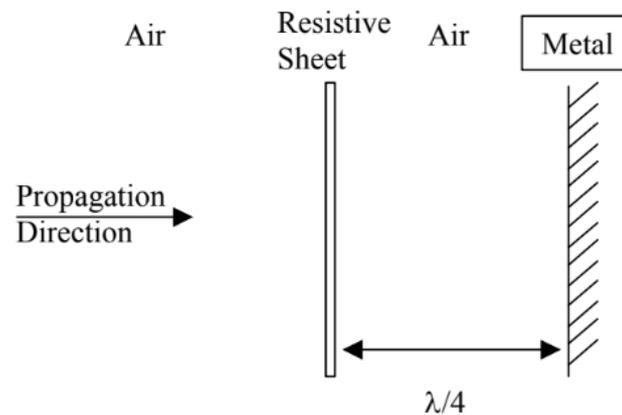
Materiais ressonantes, também chamados de absorvedores de um quarto de onda, incluem camadas de Dallenbach e telas de Salisbury. Nesses tipos de materiais, a impedância não é compatível entre o meio incidente e o meio absorvente, e o material é fino, de modo que nem toda a energia é absorvida, dessa forma, resultando em reflexão e transmissão na primeira interface (SAVILLE, 2005).

A onda refletida sofre uma inversão de fase de π . A onda transmitida atravessa o meio absorvente e é refletida por um suporte metálico. Essa segunda reflexão também resulta em uma inversão de fase de π antes que a onda se propague de volta para o meio incidente. Se a distância percorrida pela onda transmitida for um múltiplo par de $1/2$ do comprimento de onda, então as duas ondas refletidas estarão fora de fase e interferirão de forma destrutiva. Se a magnitude das duas ondas refletidas for igual, a intensidade total refletida será zero (SAVILLE, 2005).

A Tela de Salisbury, ao contrário dos absorvedores ressonantes, não depende da permissividade elétrica (ϵ) e permeabilidade magnética (μ) da camada principal. Como vemos na Figura 10, essa é composta por uma folha resistiva posicionada a um múltiplo ímpar de $1/4$ do comprimento de onda em frente a um suporte metálico (condutor), geralmente separada por um espaço de ar. Ainda assim, um material com

maior permissividade pode substituir o espaço de ar, reduzindo a espessura necessária.

Figura 10 – Tela de Salisbury.



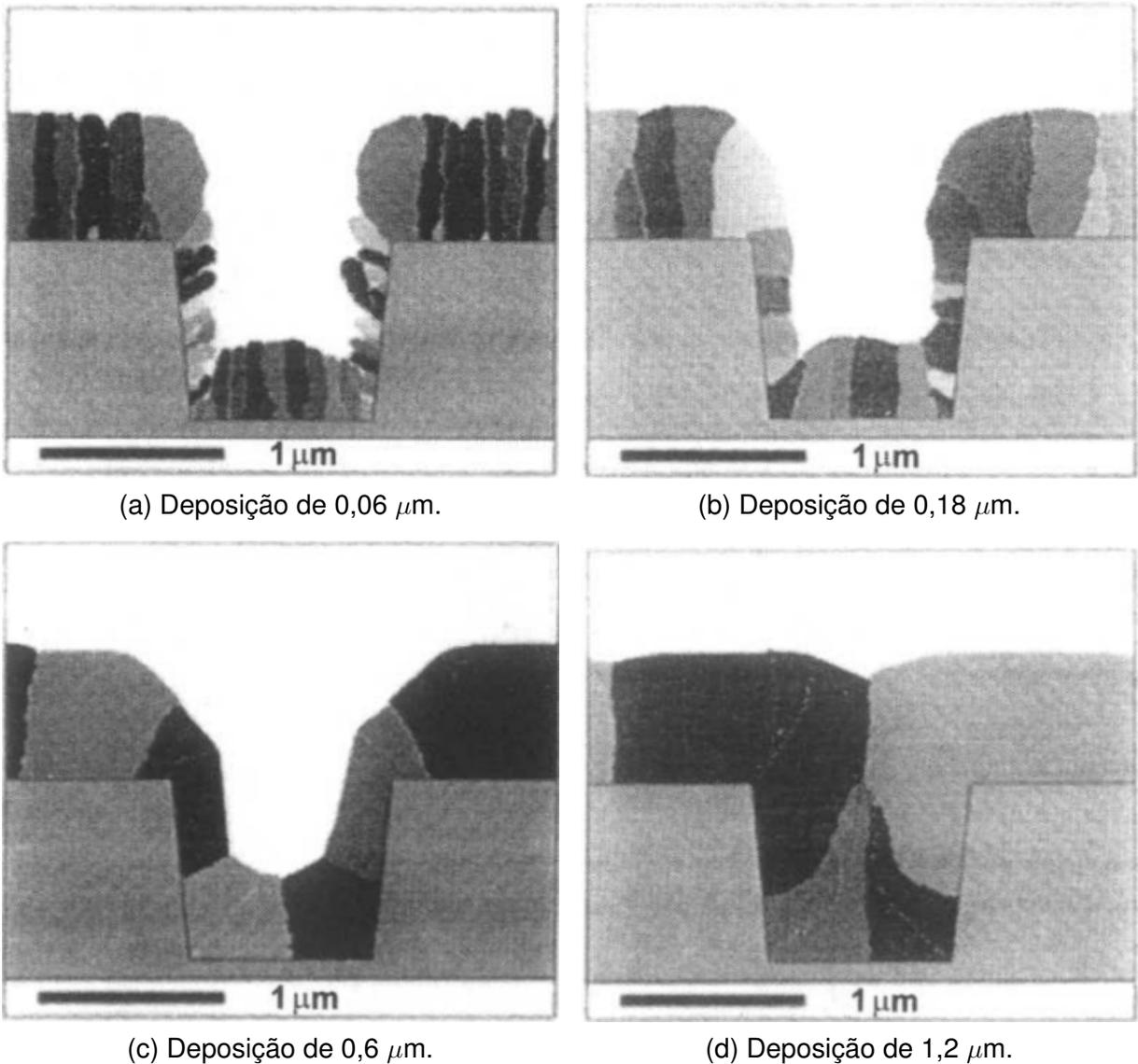
Fonte: Saville (2005, p. 13).

2.2.3 Papel do substrato no funcionamento dos Filmes Finos

Os efeitos que o substrato exerce sobre as propriedades dos filmes finos depositados podem ser de natureza física, química ou mecânica, impactando significativamente as características do filme (OHRING, 2002). Como visto, no caso dos MARE, o desempenho na atenuação de radiação eletromagnética está intimamente relacionado às propriedades elétricas e à estrutura do filme, as quais podem ser influenciadas pela interação entre o filme e o substrato.

Um dos aspectos abordados por Ohring (2002) é o impacto da rugosidade do substrato sobre a estrutura do filme, como mostra a Figura 11. A rugosidade da superfície do substrato pode afetar a nucleação e o crescimento do filme, resultando em uma distribuição não uniforme da espessura e na heterogeneidade das propriedades locais.

Figura 11 – Influência da espessura do filme na rugosidade (a) Deposição de $0,06 \mu\text{m}$; (b) Deposição de $0,18 \mu\text{m}$; (c) Deposição de $0,6 \mu\text{m}$; (d) Deposição de $1,2 \mu\text{m}$.



Fonte: Ohring (2002, p. 535).

No caso de filmes finos de Ti substratos com maior rugosidade podem induzir uma microestrutura mais desordenada no filme, favorecendo a presença de defeitos superficiais que aumentam as perdas resistivas no material, promovendo uma dissipação mais eficiente da energia da onda incidente em forma de calor (SOETHE, 2009).

Ohring (2002) também discute como a compatibilidade entre o substrato e o filme pode afetar a aderência do filme à superfície. Substratos e filmes com coeficientes de expansão térmica significativamente diferentes podem gerar tensões na

interface durante variações de temperatura, resultando em possíveis problemas como a deformação do filme.

A química da superfície do substrato exerce influência crucial na formação e nas propriedades dos filmes finos. A presença de oxidações ou impurezas pode desencadear reações químicas indesejadas durante a deposição ou tratamentos térmicos subsequentes, alterando a composição e as características do filme (OHRING, 2002).

No caso de filmes finos de Ti, a formação de camadas de óxido pode afetar a capacidade de absorção da radiação, influenciando suas propriedades de absorção de radiação eletromagnética e dissipação de energia (SARTALE et al., 2013). Por isso, a limpeza e a preparação adequadas do substrato antes da deposição são indispensáveis para assegurar as propriedades do material.

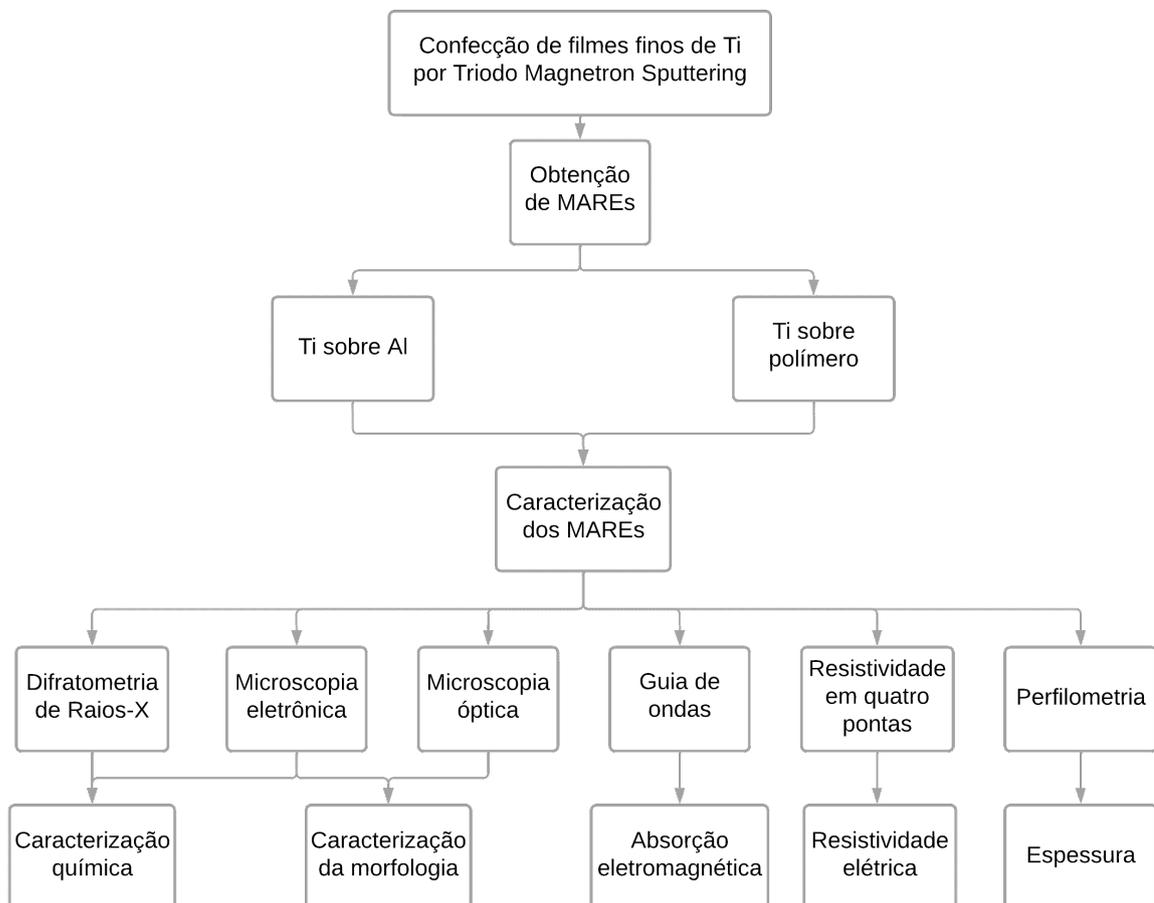
Substratos condutores, como Al, tendem a refletir parte da radiação incidente devido às suas propriedades reflexivas, o que pode limitar a eficiência de absorção do filme. Por outro lado, substratos isolantes, como polímeros, interagem de forma mais complexa com a onda e as correntes criadas no material por essa interação, normalmente, promovendo um maior nível de absorção. Essa característica torna a condutividade elétrica do substrato um parâmetro fundamental a ser considerado no projeto de MAREs, pois influencia diretamente a eficiência do material em atenuar a radiação eletromagnética (NOHARA, 2003).

Por fim, Ohring (2002) enfatiza que o controle de parâmetros dos deposição, como a taxa de crescimento do filme, a temperatura do substrato e a pressão do ambiente de deposição, são cruciais para minimizar os efeitos adversos causados pelo substrato, ilustrado na Figura 11. A otimização desses parâmetros pode permitir a manipulação das propriedades do filme, adaptando-o às necessidades específicas de cada aplicação.

3 METODOLOGIA

A preparação e obtenção das amostras são etapas fundamentais na caracterização e análise dos filmes finos. Nesse sentido, os tópicos a seguir abordam a escolha dos materiais dos substratos, os parâmetros utilizados durante deposição e por fim, os equipamentos e técnicas utilizados para a caracterização dos filmes finos obtidos. A Figura 12 exibe um fluxograma que ilustra as etapas da metodologia adotada nesta pesquisa.

Figura 12 – Fluxograma evidenciando as etapas utilizadas para o desenvolvimento do presente trabalho.



Fonte: O Autor, 2024.

3.1 PREPARAÇÃO E SELEÇÃO DOS SUBSTRATOS

Neste trabalho, foram utilizados dois tipos de substratos: Al e PET, com o objetivo de avaliar não apenas a eficiência na atenuação eletromagnética dos

filmes finos depositados, mas também investigar o papel do substrato na capacidade absorvedora dos filmes.

O Al, sendo um material condutor, apresenta baixa resistência às correntes induzidas durante o processo de atenuação eletromagnética, enquanto o PET, por suas propriedades dielétricas, atua como isolante, oferecendo maior resistência às correntes. Essas diferenças fundamentais entre os substratos permitem uma análise comparativa detalhada dos efeitos que cada tipo de material exerce na interação entre ondas eletromagnética e filmes finos.

No caso do polímero, utilizou-se um substrato à base de PET, comercialmente conhecido como Mylar1000A® com espessura de $1mm$. Esse polímero apresenta propriedades térmicas adequadas ao processo de deposição empregado com ponto de fusão superior a $200^{\circ}C$ e temperatura de transição vítrea em torno de $50^{\circ}C$. Como o tempo de deposição no TMS é pequeno, essas características garantem que sua estrutura permaneça inalterada durante a deposição dos filmes finos, mesmo sob as condições térmicas aplicadas no processo (SOETHE, 2009).

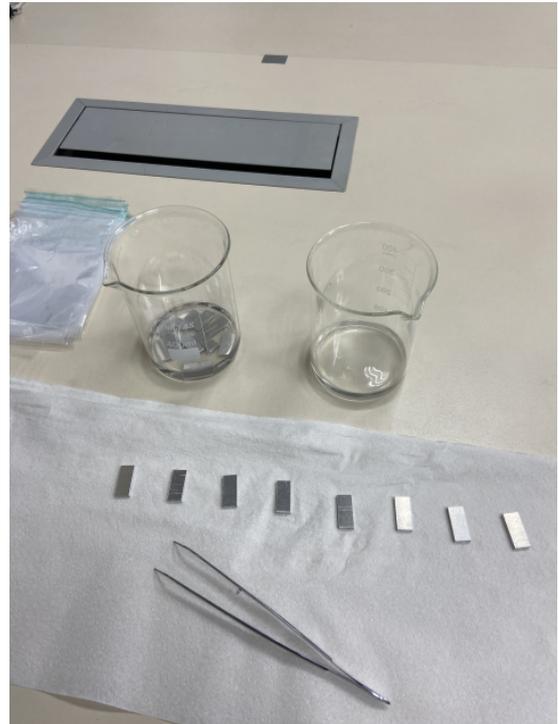
O substrato de alumínio, por sua vez, foi escolhido por ser um metal muito utilizado na indústria aeroespacial e ter como característica sua leveza, alta resistência mecânica, resistência à corrosão e excelente condutividade térmica e elétrica. Além disso, este material pode ser cortado nas dimensões exatas do equipamento de Guia de Ondas, utilizado para a caracterização eletromagnética do material.

As amostras foram cortadas em retângulos com comprimento de 2,3 cm e largura de 1 cm e, foram submetidas a uma limpeza com álcool etílico de 99,8% de pureza, utilizando um aparelho de ultrassom modelo Q3.0 da Eco Sonics por 30 minutos (Figura 13a), no Laboratório de Tratamento de Superfícies (LATS) da UFSC Joinville. Esse processo foi realizado para remover partículas e contaminantes da superfície, assegurando melhor aderência e qualidade do revestimento. Após a etapa de limpeza, as amostras foram devidamente secas (Figura 13b) e, em seguida, inseridas no reator para realização das deposições.

Figura 13 – Imagem evidenciando o processo de limpeza dos substratos utilizados para deposição dos filmes de Ti.



(a) Lavadora ultrassônica.



(b) Amostras secassem processo de secagem.

Fonte: O Autor, 2024.

A escolha do Ti para ser depositado como filme fino no presente trabalho é baseada em suas propriedades: apresenta uma alta resistência mecânica, excelente estabilidade térmica e boa condutividade elétrica, além de ser amplamente utilizado em ambientes desafiadores devido à sua resistência à corrosão (RIVERA, 2022).

As falhas na formação de camadas finas de Ti promove perdas resistivas na interação com a radiação, o que potencializa sua capacidade de atenuação (SOETHE et al., 2011). Além disso, Quadros (2014) evidencia que, ao otimizar os processos de deposição e tratamento superficial, é possível melhorar as características do Ti, tornando-o ainda mais eficiente na função de MARE. A combinação dessas propriedades torna o Ti uma escolha ideal, apoiada pelos resultados consistentes de estudos prévios.

3.2 OBTENÇÃO DAS AMOSTRAS

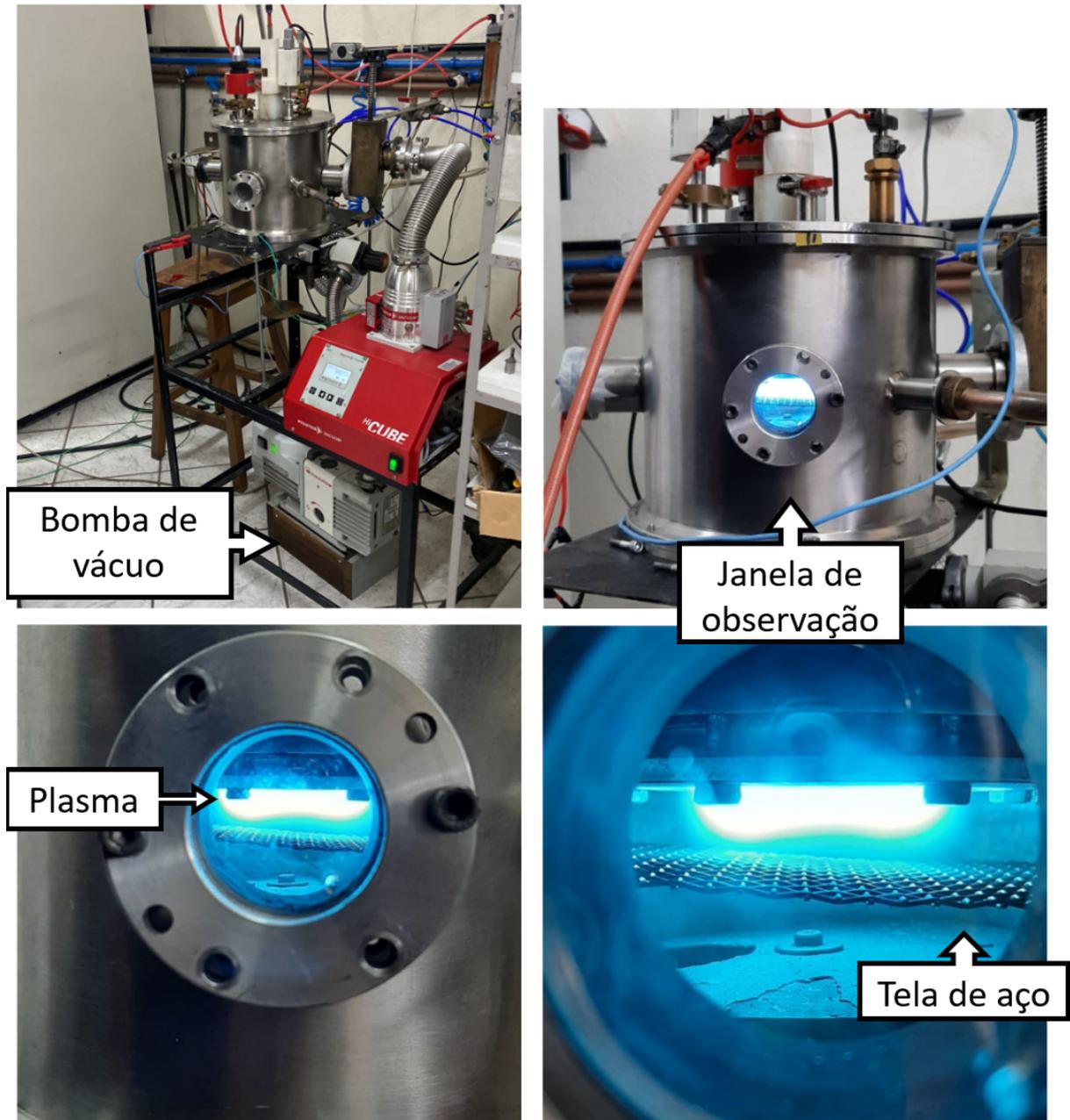
Filmes finos de Ti foram depositados utilizando um equipamento do tipo Triodo Magnetron Sputtering do Laboratório de Plasmas, Filmes e Superfícies do Departamento de Física da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC).

Na sequência são apresentadas as características do equipamento empregado e os parâmetros utilizados para as deposições.

3.2.1 Triodo Magnetron Sputtering (TMS)

Na Figura 14 é apresentada uma imagem do equipamento utilizado para a deposição dos filmes finos que é composto basicamente por uma câmara de aço inoxidável, equipada com quatro janelas de observação. O sistema é vedado e conectado a uma bomba de vácuo, permitindo alcançar vácuo da ordem de 10^{-6} Torr. A alimentação catódica é realizada por meio de uma fonte de tensão composta por um controlador de voltagem, um transformador e uma ponte retificadora de onda completa. Com essa configuração, é possível obter tensões variáveis entre 0 e 1000 V e correntes na faixa de 0 a 10 A, dependendo da distância entre a tela e o alvo.

Figura 14 – Triodo Magnetron Sputtering (TMS) do Laboratório de Plasmas, Filmes e Superfícies, gIsUDESC - Joinville.



Fonte: O Autor, 2024.

Os filmes metálicos de Ti foram depositados sob as mesmas condições experimentais, mas com tempos distintos de deposição, resultando em diferentes espessuras, como visto na Tabela 4. Foram realizadas duas deposições com durações de 43 e 71 segundos, visando obter espessuras de 23,7 nm e 39 nm, respectivamente. Essas espessuras foram selecionadas com base em estudos prévios sobre filmes finos de Ti obtidos por TMS que indicaram essas espessuras como as mais promissoras para atenuação eletromagnética (SOETHE, 2009).

Tabela 4 – Parâmetros de deposição dos filmes finos de Ti (TMS).

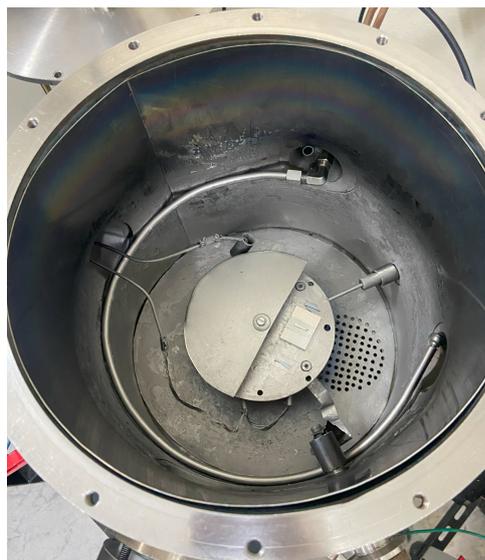
Deposição	Tempo [segundos]	Corrente [A]	Tensão [V]	Pressão [mTorr]	Distância do alvo [cm]
Deposição 1 (alvo 23,7nm)	43	0,5	399	3	7
Deposição 2 (alvo 39nm)	71	0,5	399	3	7

Fonte: O Autor, 2024.

Para determinar os tempos de deposição, inicialmente foi realizada uma deposição para calcular a taxa de deposição do equipamento, sobre três amostras de Si que foram posicionadas em diferentes posições dentro do reator (esquerda, centro e direita). Após a medição das espessuras depositadas nessas amostras, foi calculada uma taxa de deposição média global do reator de 0,547 nm/s que permitiu obter um valor mais preciso da taxa de deposição para as condições de deposição utilizadas.

Com todos os parâmetros definidos em cada rodada de deposição, foram posicionadas três amostras de polímero, três de Al e uma de Si dentro do TMS. Sobre uma das amostras de polímero, uma de Al e a de Si, foram colocadas lascas de Si visando criar um degrau na deposição para posterior medição da espessura dos filmes depositados, como pode ser observado na Figura 15.

Figura 15 – Imagem evidenciando as amostras posicionadas no reator TMS antes do processo de deposição.



Fonte: O Autor, 2024.

3.3 CARACTERIZAÇÃO DOS FILMES FINOS

Na sequência são apresentadas as técnicas empregadas para a caracterização morfológica, elétrica e de absorção da radiação eletromagnética nos filmes finos de Ti depositados por TMS nos diferentes substratos.

3.3.1 Perfilometria

As medidas da espessura dos filmes finos de titânio foram realizadas utilizando-se um sistema de perfilometria da marca Bruker, modelo Dektak XT, do Laboratório de Filmes Finos do Departamento de Física da UDESC. Na Figura 16 são apresentadas imagens evidenciando equipamento utilizado para avaliação da espessura dos filmes finos depositados.

Figura 16 – Equipamento de perfilometria utilizado para medida da espessura dos filmes finos depositados.



(a) Visão geral do equipamento.



(b) Ponta de medição.

Fonte: O Autor, 2024.

Como mencionado anteriormente, para cada deposição realizada, foram colocados pequenos pedaços de Si sobre a superfície das amostras de polímero, Al e Si, com o objetivo de criar um degrau no recobrimento.

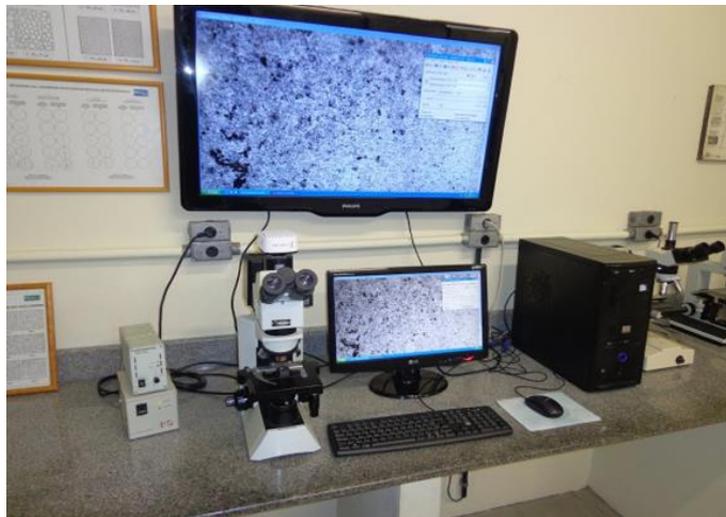
Assim, após a remoção destes pedaços de silício, parte do substrato ficou exposto permitindo a medida da espessura do filme por meio de uma ponta que desliza

sobre a superfície da amostra. A espessura foi determinada pela diferença de altura entre o filme recoberto e o substrato exposto. Para cada amostra foram feitas dez medições e calculada a média, com o intuito de minimizar os erros experimentais.

3.3.2 Microscopia Óptica

Com o objetivo de examinar as características superficiais e a continuidade dos revestimentos obtidos, foram realizadas sobre os filmes finos de titânio análise utilizando a técnica de microscopia óptica. Para isso, um microscópio óptico do Laboratório de Metalografia e Microscopia Óptica da UDESC em Joinville, da marca OLYMPUS, apresentado na Figura 17, foi utilizado.

Figura 17 – Imagem do Microscópio óptico da UDESC.



Fonte: O Autor, 2024.

Imagens foram capturadas com ampliações de 40x, 100x e 200x, permitindo uma visualização mais detalhada da superfície dos filmes finos, incluindo a análise macroscópica da superfície, morfologia, e possíveis defeitos, como arranhões, rachaduras e a textura do material.

3.3.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Para a análise das estruturas microscópicas com alta resolução, foi utilizado o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) modelo JEOL JSM-6390LV, no Laboratório Central de Microscopia Eletrônica da Universidade Federal de Santa Catarina, campus Florianópolis (Figura 18).

Figura 18 – Microscópio eletrônico de varredura (MEV), UFSC - Florianópolis.



Fonte: O Autor, 2024.

Este equipamento, com filamento de tungstênio, opera em uma faixa de voltagem de aceleração de 0,5 kV a 30 kV, oferecendo resolução de 3 nm a alta tensão e 4 nm a baixa tensão. As amostras foram analisadas em ampliações de 1000x, 4000x e 10.000x, todas realizadas com voltagem de 10 kV, permitindo uma avaliação detalhada da morfologia superficial e eventuais descontinuidades ao nível microscópico no revestimento.

A alta resolução do MEV permitiu uma análise precisa da dispersão e uniformidade dos filmes depositados, revelando detalhes da estrutura superficial, identificando possíveis aglomerados ou irregularidades presentes e a possível influência do substrato na morfologia dos filmes finos.

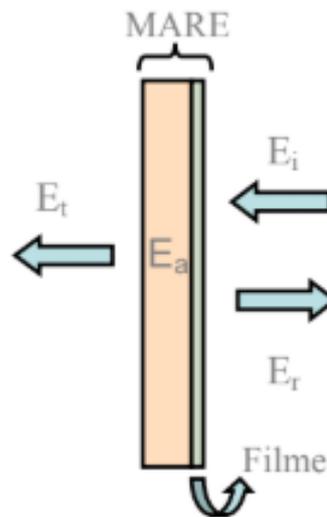
3.3.4 Caracterização eletromagnética utilizando equipamento de Guia de Ondas

Os filmes finos de titânio foram avaliados quanto à sua capacidade de atenuação da radiação eletromagnética na faixa de frequência de micro-ondas (8-12 GHz). A análise baseou-se nos princípios de conservação de energia, considerando as energias incidente (E_i), refletida (E_r), transmitida (E_t) e absorvida ou atenuada (E_a). O equilíbrio energético foi verificado conforme a Equação 18 (SOETHE, 2009):

$$E_i = E_r + E_t + E_a \quad (18)$$

Pode-se representar estas energias como apresentado na Figura 19.

Figura 19 – Princípio da conservação de energia da onda eletromagnética.



Fonte: Soethe (2009, p. 124).

A capacidade de absorção do MARE foi determinada utilizando a técnica de Refletividade, que mede a quantidade de sinal absorvido. O experimento foi realizado com um Guia de Ondas operando nas Bandas X (8–12 GHz) acoplado a um Analisador de Redes Vetoriais (VNA), modelo N523A da Agilent Technologies, localizado no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

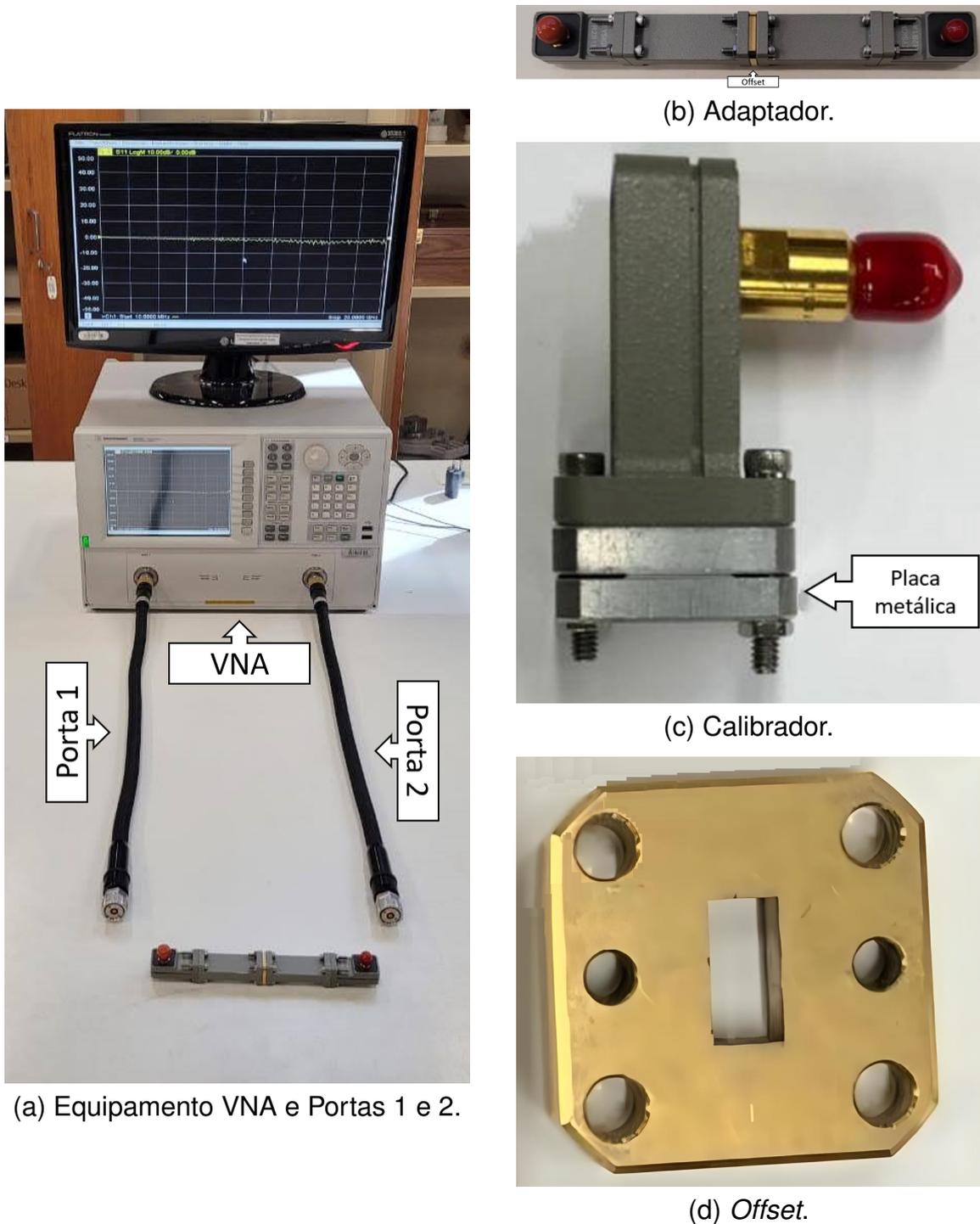
Para garantir a precisão e confiabilidade das medições de refletividade foram utilizados acessórios especializados. A placa metálica apresentada na Figura 20(c) desempenhou um papel essencial na calibração do sistema, atuando como padrão para estabelecer a refletividade zero. Esse procedimento assegurou que as medições fossem consistentes, permitindo que qualquer absorção observada fosse atribuída exclusivamente ao material em análise (SOUZA, 2021).

O Guia de Ondas conectado ao VNA foi responsável por direcionar as ondas eletromagnéticas ao material em estudo, permitindo a medição da refletividade em frequências específicas. Para garantir que a onda alcançasse o material de forma uniforme, utilizou-se um ajuste de offset, ilustrado na Figura 20(d).

Além disso, um acessório de acoplamento foi utilizado para criar uma conexão firme entre o Guia de Ondas, o VNA e o material de teste, como visto na Figura 20(b),

esse componente minimiza as perdas de sinal e interferências.

Figura 20 – Imagem ilustrando o equipamento de Guia de Ondas:(a)VNA suas Portas de passagem de onda;(b) Adaptador; (c) Calibrador do equipamento; (d) Offset.



Fonte: O Autor, 2024.

Esse sistema foi configurado para medir os parâmetros de espalhamento S ,

os quais fornecem informações sobre as características de reflexão e transmissão da onda eletromagnética ao interagir com o material em estudo.

Os parâmetros medidos foram registrados em magnitude linear que representa a amplitude do sinal medido, como o campo elétrico (E) ou magnético (B), em escala linear. Nos parâmetros S , ela é a razão entre a amplitude da onda refletida ou transmitida e a onda incidente (BONAGUIDE; JARVIS, 2019a). Os dados foram obtidos e organizados em um arquivo contendo as seguintes colunas:

1. Frequência (f);
2. Magnitude de S_{11} → Onda saiu da Porta 1 e retornou para a Porta 1 (reflexão);
3. Fase de S_{11} ;
4. Magnitude de S_{21} → Onda saiu da Porta 1 e retornou para a Porta 2 (transmissão);
5. Fase de S_{21} ;
6. Magnitude de S_{12} → Onda saiu da Porta 2 e retornou para a Porta 1 (transmissão);
7. Fase de S_{12} ;
8. Magnitude de S_{22} ; → Onda saiu da Porta 2 e retornou para a Porta 2 (reflexão);
9. Fase de S_{22} .

Neste estudo serão utilizados apenas os parâmetros S_{11} e S_{21} que representam respectivamente, a fração de amplitude da onda refletida e transmitida em relação à onda incidente da Porta 1 do VNA.

Com base nos dados obtidos, o balanço de energia foi calculado a partir da Equação 18, chegando assim na Equação 19:

$$E_a = E_i - (E_r + E_t) \quad (19)$$

Como os valores dos parâmetros S estão em magnitude linear, esses são normalizados para que a onda incidente tenha amplitude unitária ($S_{\text{incidente}} = 1$), sendo tratada como 100% do total, ou seja, S_{11} e S_{21} são expressos como frações (valores entre 0 e 1) (BONAGUIDE; JARVIS, 2019b).

Segundo Pozar (2012), para calcular a intensidade das ondas refletida e transmitida é necessário elevar ao quadrado os valores das magnitudes lineares, uma vez que a intensidade de uma onda eletromagnética é proporcional ao quadrado da sua amplitude, como mencionado na Equação 12. Assim:

- $E_r \rightarrow |S_{11}|^2$;
- $E_t \rightarrow |S_{21}|^2$;

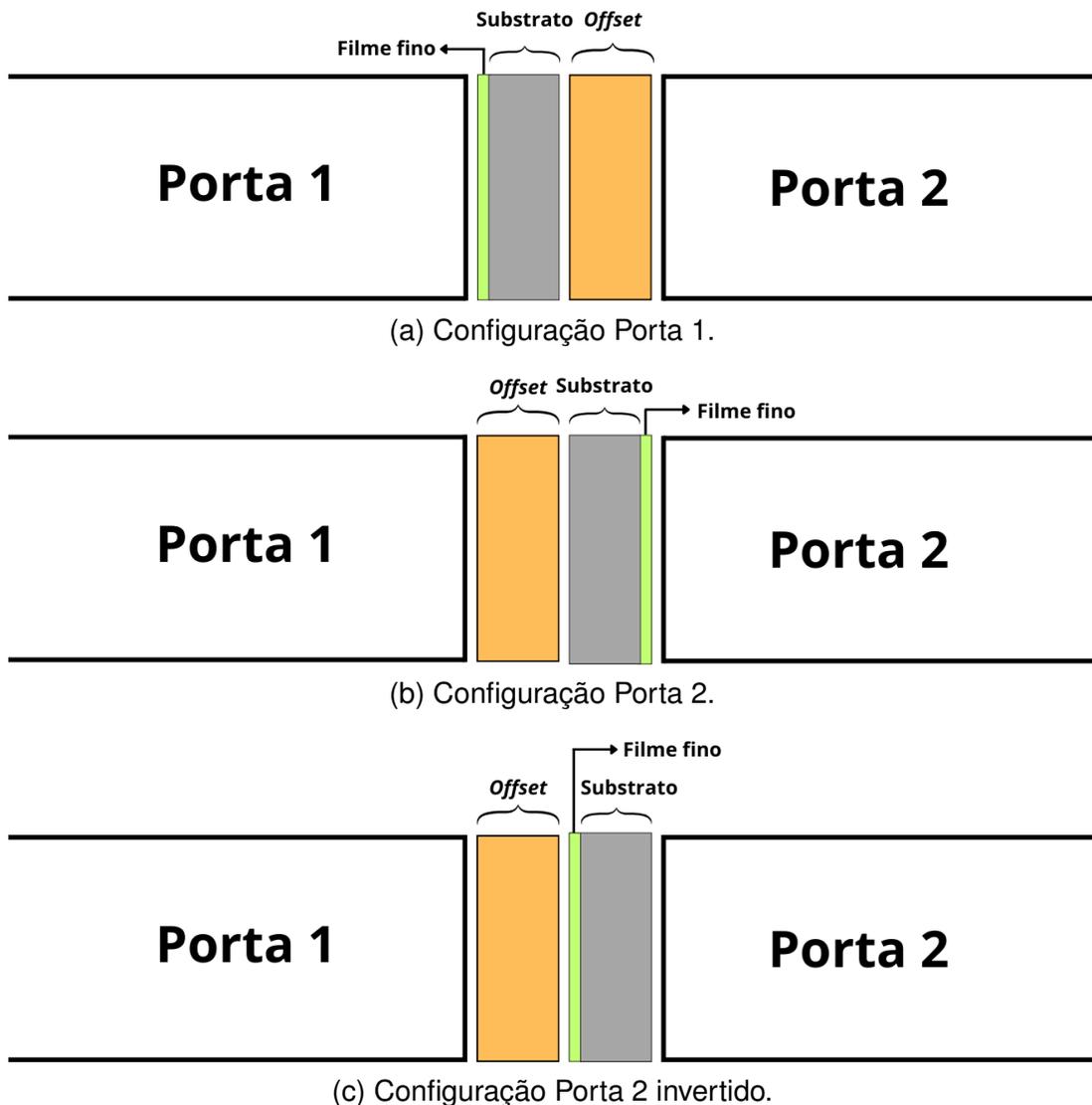
Dessa forma, a Energia Atenuada pelo material foi calculada como expressa a Equação 20:

$$E_a = 1 - (|S_{11}|^2 + |S_{21}|^2) \quad (20)$$

As medições foram feitas em três configurações, nomeadas da seguinte forma: Porta 1, Porta 2 e Porta 2 invertido.

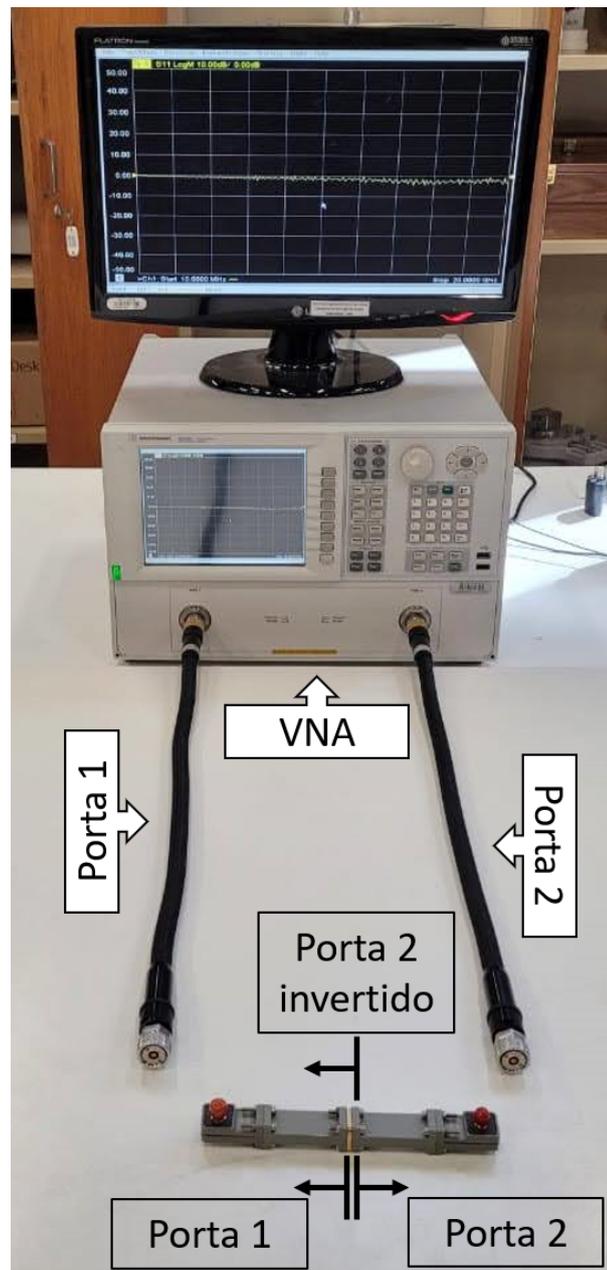
Na medição denominada Porta 1, a amostra foi posicionada com *offset* (Figura 20(d)), encostada no adaptador do lado mais próximo à Porta 1. Nas medições Porta 2 e Porta 2 Invertido, as amostras ficaram encostadas no adaptador do lado mais próximo à Porta 2 para facilitar a compreensão. Na Figura 21 há uma ilustração mais detalhada.

Figura 21 – Esquema das configurações das medidas feitas no equipamento Guia de Ondas. (a) Porta 1; (b) Porta 2; (c) Porta 2 invertido.



Além disso, nas medições Porta 1 e Porta 2 Invertido, o filme fino foi posicionado com o lado voltado para a Porta 1, enquanto na medição Porta 2, o filme fino ficou voltado para a Porta 2 como podemos perceber na Figura 21. Na Figura 22 podemos observar como é o equipamento montado e onde as amostras ficam posicionadas. Estas medidas fornecem informações diferentes e complementares da interação da onda eletromagnética com o conjunto filme/substrato e permitem avaliar a influência do substrato nesta interação.

Figura 22 – Ilustração das configurações feitas nas medições com o equipamento Guia de Ondas.



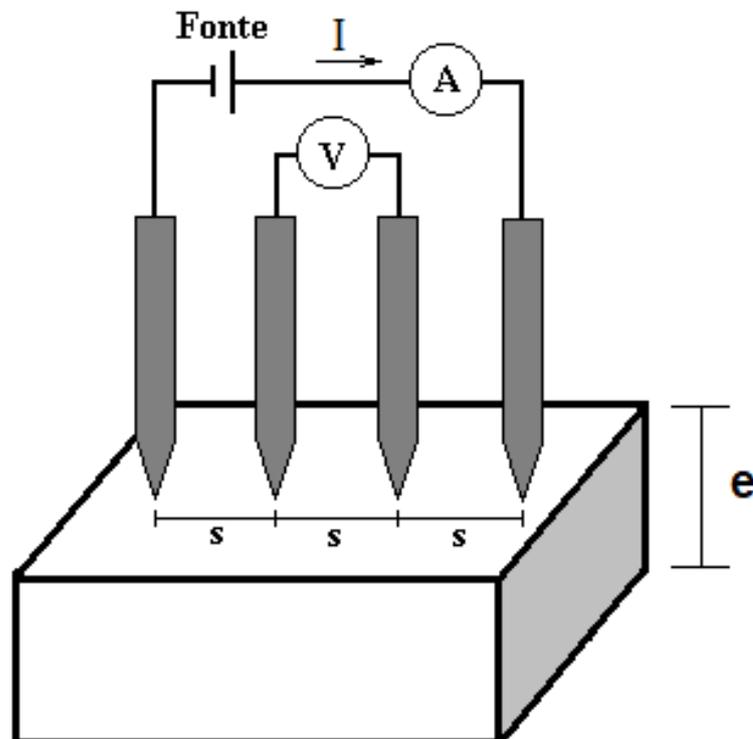
Fonte: O Autor, 2024.

3.3.5 Medida de resistividade

Para estabelecer um paralelo entre as características de absorção dos filmes finos e suas propriedades intrínsecas, foram realizadas medições de resistividade utilizando um equipamento de resistividade elétrica de quatro pontas. Estas análises foram conduzidas no Laboratório de Tratamento de Superfícies (LaTS ou LST — Laboratory of Surface Treatments) da UFSC - Joinville.

O método de quatro pontas é amplamente utilizado para medir a resistividade elétrica de materiais, especialmente filmes finos e semicondutores, devido à sua precisão e versatilidade. Ele utiliza quatro agulhas metálicas alinhadas linearmente: as duas pontas externas aplicam uma corrente (I) no material, enquanto as duas internas medem a diferença de potencial (V) gerada pela passagem dessa corrente como ilustrado na Figura 23. O uso de pontas separadas para corrente e tensão minimiza o impacto da resistência dos contatos entre as pontas e o material, aumentando a exatidão da medição (ARAUJO et al., 2002).

Figura 23 – Esquema de funcionamento do equipamento de resistividade elétrica de quatro pontas.



Fonte: Araujo et al. (2002, p. 642).

Um medidor de quatro pontas com uma mesa modelo S302 da marca Signatone alimentado por uma SMU (modelo 2400 da marca Keithley) foi utilizado para determinar as propriedades elétricas dos filmes finos. A Figura 24a apresenta uma imagem

ilustrativa do equipamento de resistividade de quatro pontas utilizado para caracterizar as propriedades elétricas dos filmes finos.

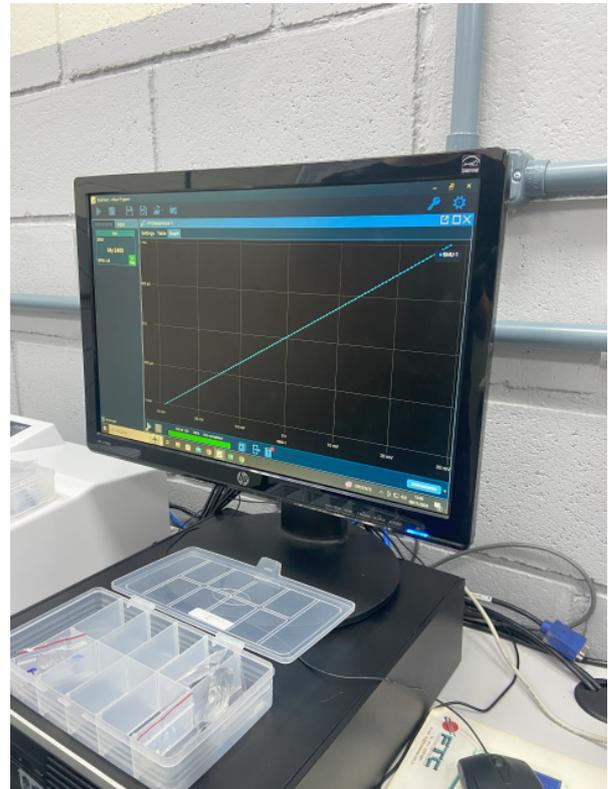
Foram realizadas medições em um total de oito amostras, sendo quatro com substrato de Al e quatro com substrato de polímero. Para cada uma dessas amostras, foram realizadas três medições distintas.

Nas medições realizadas utilizando o método de quatro pontas, o comportamento da resistividade dos filmes finos (ρ_f) foi avaliado em função da espessura dos recobrimentos (e) e da razão entre a tensão (V) e a corrente (I). Os dados foram coletados aplicando-se uma corrente nominal e, posteriormente, registrando a tensão correspondente em intervalos cíclicos como observa-se na Figura 24b. A amostragem em múltiplos pontos de tensão e corrente reduz os erros experimentais, pois o resultado de interesse é calculado pela inclinação da reta ajustada aos dados do diagrama de tensão versus corrente (SMITH, 1995).

Figura 24 – Equipamento de resistividade elétrica de quatro pontas para medidas de propriedades elétricas dos filmes finos de titânio sobre diferentes substratos evidenciando: (a) Mesa de apoio do equipamento, onde fica a amostra; (b) Gráfico de Tensão (V) x Corrente (I) obtido através das medidas.



(a) Mesa modelo S302.



(b) Medidas de Tensão (V) x Corrente (I).

Fonte: O Autor, 2024.

3.3.6 Difratometria de Raios-X (DRX)

A técnica de Difratometria de Raio X (DRX) desempenha um papel fundamental na identificação química dos compostos em filmes finos. Neste trabalho, a técnica de DRX teve como objetivo caracterizar e qualificar os compostos presentes nas amostras, investigando a relação entre essas composições químicas e as propriedades de absorção apresentadas pelos filmes (RAMADE et al., 2023).

A técnica DRX inicia-se com a definição do intervalo de varredura para o ângulo 2θ (deg), que corresponde aos ângulos nos quais o feixe de raios X interage com os planos cristalinos do material. Durante a varredura, o equipamento registra a intensidade do raio-X difratado em função do ângulo. Os dados obtidos são representados em gráficos que mostram os padrões de difração, onde os picos refletem a interação dos raios X com os diferentes planos cristalinos da amostra. Esses picos são analisados para determinar as fases cristalinas presentes, bem como para obter informações sobre a composição, estrutura e características dos filmes analisados.

As medições de DRX foram realizadas utilizando o equipamento modelo 6000 da SHIMADZU, disponível na UDESC, ilustrado na Figura 25.

Figura 25 – Imagem ilustrativa do difratômetro de Raios-X da UDESC-Joinville.



Disponível em: https://www.udesc.br/cct/centro_multiusuario/infraestrutura/drx.
Acesso em: 26 de novembro de 2024.

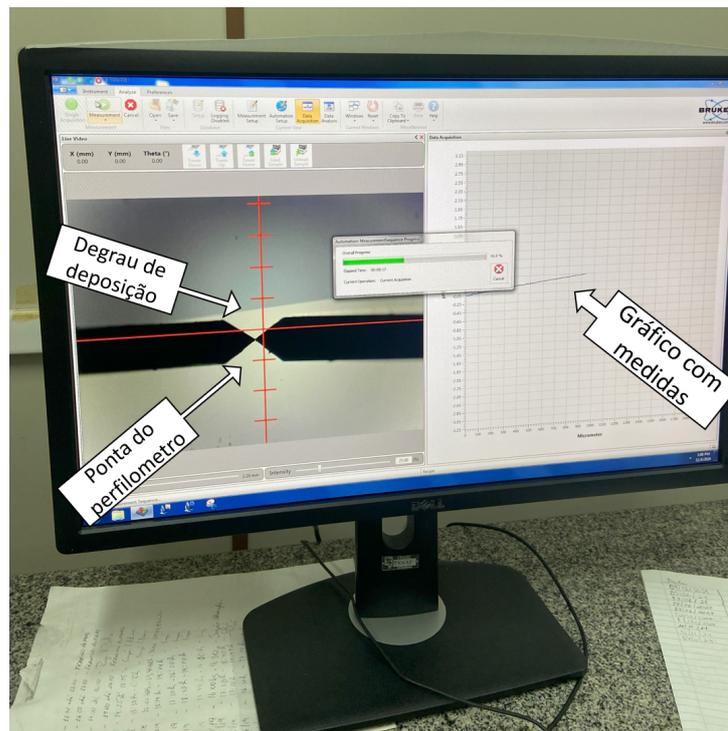
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentados os principais resultados obtidos ao longo deste estudo com relação à avaliação das características morfológicas, espessura, propriedades elétricas e absorvedoras dos filmes finos de Ti.

4.1 ANÁLISE DE PERFILOMETRIA

Uma das técnicas empregadas para a medição de espessura é a análise por perfilometria que consiste na avaliação do degrau formado entre as regiões com e sem o recobrimento metálico. Na Figura 26 é possível observar a ponta do perfilômetro durante a aquisição de dados para as medidas de espessura, utilizado na identificação do degrau da superfície.

Figura 26 – Imagem evidenciando o ensaio de perfilometria para medidas de espessura dos filmes finos.



Fonte: O Autor, 2024.

Entretanto, as medições de espessura só puderam ser realizadas nas amostras com substrato de Si, devido às suas características de baixa rugosidade superficial. Nas amostras com substrato de polímero e Al, a rugosidade superficial é da ordem de micrômetros (μm ; $10^{-6}m$), enquanto as espessuras dos filmes de Ti são da ordem

de nanômetros (nm ; $10^{-9}m$), dificultando a identificação do degrau no recobrimento e inviabilizando as medições nessas amostras. Os resultados, incluindo as dez medições e a média delas, estão apresentados na Tabela 5.

Os valores médios das espessuras ficaram muito próximos àqueles definidos inicialmente como valores alvo de 23,7 nm e 39 nm. Essas espessuras foram selecionadas com base em estudos prévios sobre filmes finos de Ti obtidos por TMS, que indicaram essas espessuras como as mais promissoras para atenuação eletromagnética (RIVERA, 2022).

Este resultado se deve as deposições iniciais realizadas sobre os substratos de Si, que permitiram retirar de forma mais precisa a taxa de deposição do reator utilizando os parâmetros listados na Tabela 4.

Tabela 5 – Resultado das medidas da espessura dos filmes finos de Ti obtidos com as amostras de Si pela técnica de perfilometria.

Medição	Amostra 1 [nm]	Amostra 2 [nm]
1	31,6	30,7
2	28	34,6
3	21,2	41,4
4	26	40,6
5	24,3	43
6	15,5	39,2
7	15,3	43,2
8	23,7	41,7
9	19,3	42,4
10	20,8	32,8
Média	$22,57 \pm 5,22$	$38,96 \pm 4,56$

Fonte: O Autor, 2024.

Ao analisar os resultados apresentados na Tabela 5, observa-se que os desvios entre as medidas de espessura são significativos, com valores do desvio padrão de 5,22 nm e 4,56 nm para as Amostras 1 e 2, respectivamente. Esses desvios podem ser atribuídos às limitações da técnica de perfilometria utilizada.

Apesar disso, a espessura média obtida a partir da análise dos substratos de silício aproxima-se de forma significativa dos valores esperados. Para os cálculos subsequentes deste trabalho, foram adotadas as espessuras de 22,6 nm para a Amostra 1 e 39 nm para a Amostra 2.

4.2 ANÁLISE DE MICROSCOPIA ÓPTICA

Nesta seção são apresentadas as imagens obtidas por microscopia óptica dos filmes finos depositados sobre o substrato de alumínio e de polímero. Essa técnica permite avaliar a morfologia e a estrutura superficial dos filmes, o que é fundamental, pois as características estruturais e morfológicas do revestimento influenciam diretamente sua capacidade de absorção e dissipação de energia eletromagnética. As Tabelas 6 e 7 apresentam os resultados da análise de microscopia óptica dos filmes finos de Ti, com aumento de 100X.

Ao comparar as imagens das Tabelas 6 e 7, observa-se que o substrato polimérico apresenta significativamente menos quantidades de defeitos e irregularidades em comparação ao substrato de Al .

As imagens Al (meio) da Tabela 7 ilustram as amostras submetidas ao processo de deposição, no qual um pequeno pedaço de Si foi posicionado sobre a superfície, resultando em um degrau entre a área recoberta pelo filme e a área exposta do substrato. A região mais clara das imagens localizada na parte inferior, representa as áreas com deposição. Vale destacar que, apesar da rugosidade do substrato ser significativamente maior do que a espessura do filme depositado, observa-se uma redução na rugosidade superficial nas regiões recobertas pelo filme.

Tabela 6 – Microscopia óptica de filmes finos de Ti sobre substrato de polímero.

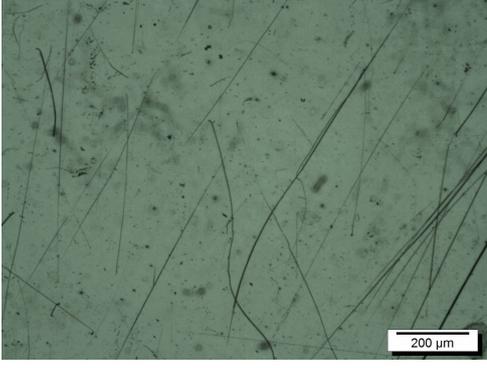
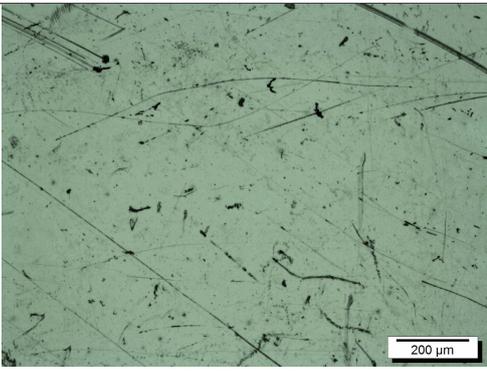
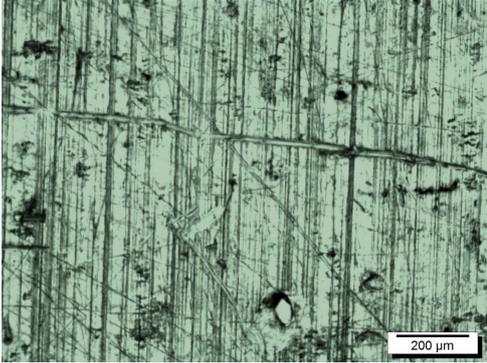
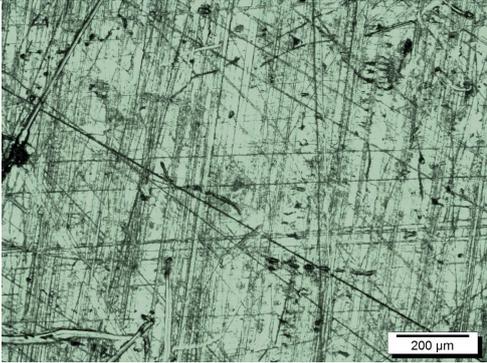
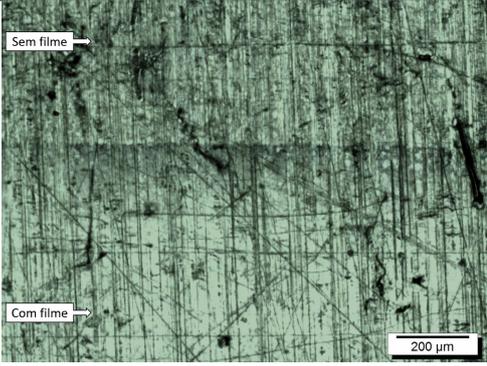
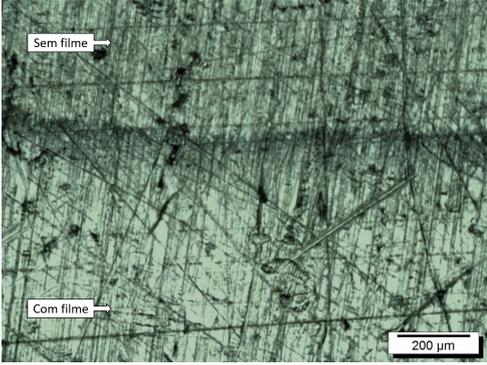
	<p>Polímero - 22,6 nm. Filme fino depositado sobre substrato de polímero com espessura de 22,6 nm.</p>
	<p>Polímero - 39 nm. Filme fino depositado sobre substrato de polímero com espessura de 39 nm.</p>

Tabela 7 – Microscopia óptica de filmes finos de Ti sobre substrato de Al.

	<p>Al - 22,6 nm. Filme fino depositado sobre substrato de alumínio com espessura de 22,6 nm.</p>
	<p>Al - 39 nm. Filme fino depositado sobre substrato de alumínio com espessura de 39 nm.</p>
	<p>Al (meio) - 22,6 nm. Filme fino depositado sobre substrato de alumínio com espessura de 22,6 nm. Substrato sem revestimento na parte central da amostra.</p>
	<p>Al (meio) - 39 nm. Filme fino depositado sobre substrato de alumínio com espessura de 39 nm. Substrato sem revestimento na parte central da amostra.</p>

Fonte: O Autor, 2024.

Os resultados obtidos por meio da análise de microscopia óptica forneceram informações sobre as propriedades superficiais dos filmes finos de titânio. Pode-se observar que os revestimentos acompanham a morfologia do substrato e por serem da

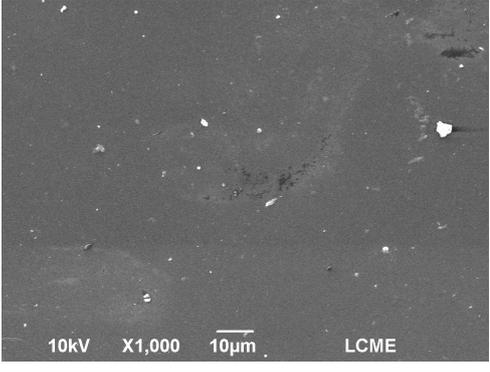
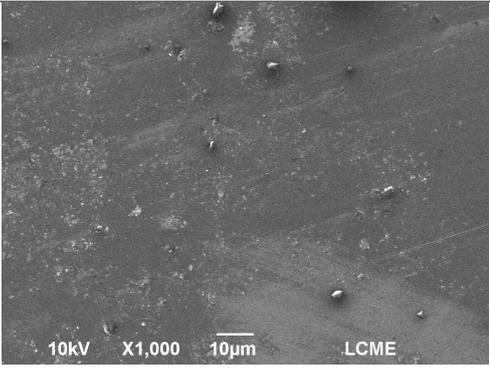
ordem de nanômetros, reproduzem todas as imperfeições dos mesmos (PANJAN et al., 2020).

4.3 ANÁLISE DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

Nesta seção são apresentadas as imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) para os filmes finos obtidos nas quatro condições estudadas. A técnica de MEV possibilita uma avaliação detalhada da morfologia e topografia das amostras, permitindo correlacionar esses resultados com aqueles relacionados à absorção e dissipação de energia eletromagnética.

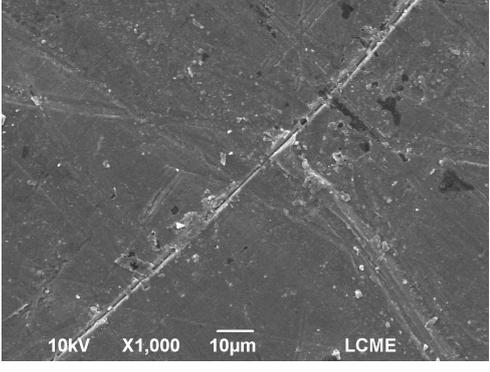
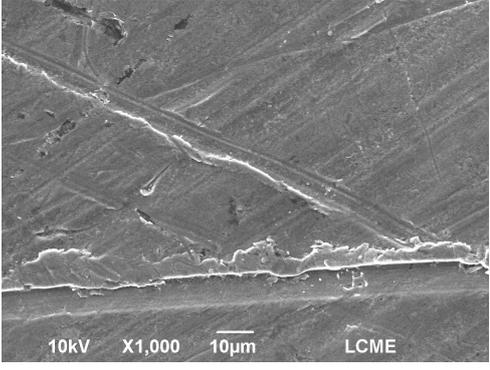
As micrografias dos filmes finos obtidas por MEV com aumento de 1000x estão apresentadas nas Tabelas 8 e 9.

Tabela 8 – Microscopia eletrônica de varredura (MEV) de filmes finos sobre substrato de polímero, com ampliação de 1000x.

	<p>Polímero - 23 nm. Filme fino depositado sobre substrato de polímero com espessura de 23 nm.</p>
	<p>Polímero - 39 nm. Filme fino depositado sobre substrato de polímero com espessura de 39 nm.</p>

Fonte: O Autor, 2024.

Tabela 9 – Microscopia eletrônica de varredura (MEV) de filmes finos sobre substrato de alumínio (Al), com ampliação de 1000x.

	<p>Alumínio - 23 nm. Filme fino depositado sobre substrato de alumínio com espessura de 23 nm.</p>
	<p>Alumínio - 39 nm. Filme fino depositado sobre substrato de alumínio com espessura de 39 nm.</p>

Fonte: O Autor, 2024.

Nos resultados obtidos por MEV, observam-se pequenas ilhas ou manchas de deposição de Ti, principalmente nas imagens da Tabela 8. Isso provavelmente se deve à superfície menos rugosa do polímero, o que facilita a formação e identificação dessas estruturas.

Essas ilhas em combinação com um substrato isolante aumentam a resistência elétrica, aprimorando a absorção de radiação. Esse mecanismo é análogo ao comportamento de superfície com descontinuidades, o qual promove melhora na atenuação associado a presença de imperfeições na superfície. Nesse contexto, pode-se traçar uma analogia entre o sistema filme/substrato e um circuito capacitivo/resistivo (SOETHE, 2009).

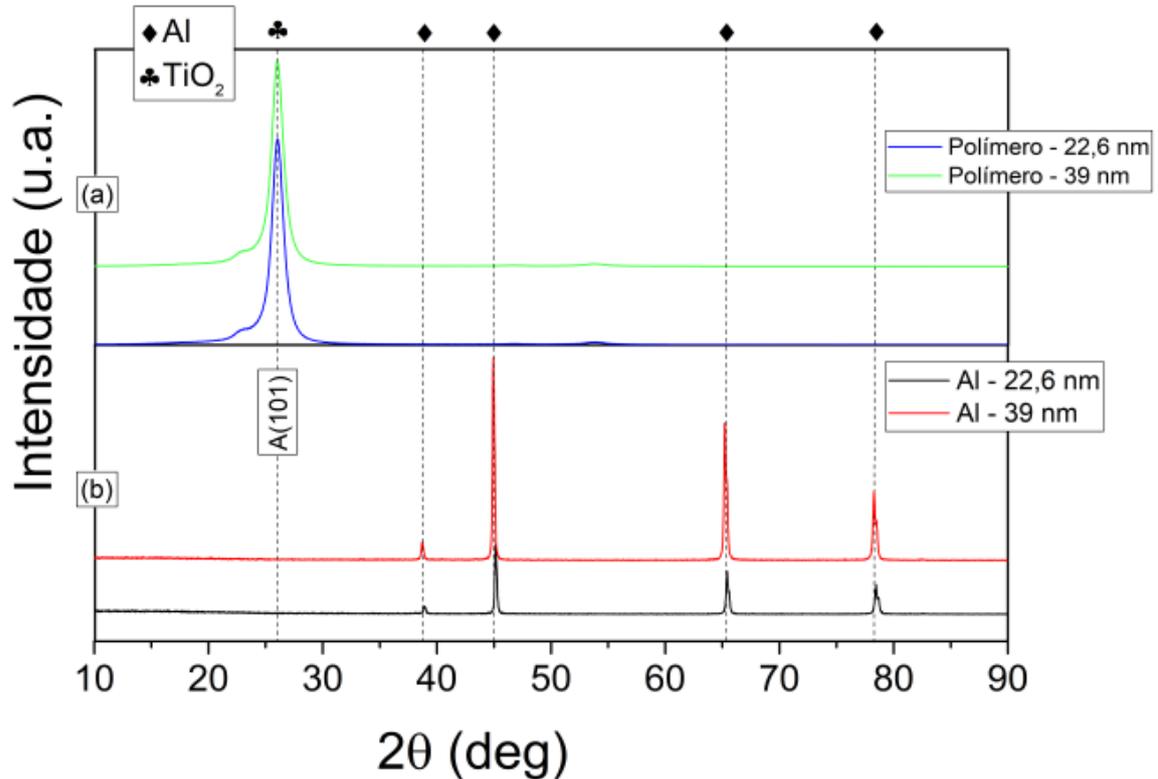
Entretanto, a análise das resistências elétricas das amostras associada às imagens obtidas por MEV, pode permitir traçar uma correlação entre a microestrutura dos filmes finos e suas propriedades elétricas.

4.4 DIFRAÇÃO DE RAIOS-X

Para avaliar a composição química dos filmes finos obtidos, foi realizada uma análise de difração de raios-X com o ângulo de incidência do feixe variando de 10° à

90°. A Figura 27 apresenta os resultados dessa análise para os diferentes filmes finos de Ti, com espessuras de 22,6 nm e 39 nm sobre os substratos de alumínio e polímero.

Figura 27 – Análise de difração de raios-x para os filmes de Ti depositados sobre Al e polímero.



Fonte: O Autor, 2024.

Essas análises foram realizadas com o objetivo de determinar de forma qualitativa, a composição química dos elementos e compostos presentes nos filmes estudados.

Os resultados indicaram que nos filmes com substrato de polímero (Figura 27) ocorreu a formação predominante de TiO_2 . A formação deste composto pode estar associada a presença de oxigênio no gás residual ou ainda uma oxidação após o processo de deposição (RAMADE et al., 2023).

Esses filmes de TiO_2 apresentam uma fase preferencial de anatase (Figura 27), com o pico principal atribuído ao cristal único A(101). A fase anatase é caracterizada por uma estrutura tetragonal, sendo assim, possui alta constante dielétrica e resistência elétrica, características estas que o possibilitam de ser aplicado em várias áreas (RAMADE et al., 2023).

Na Figura 27, são apresentados os resultados das amostras com substrato de

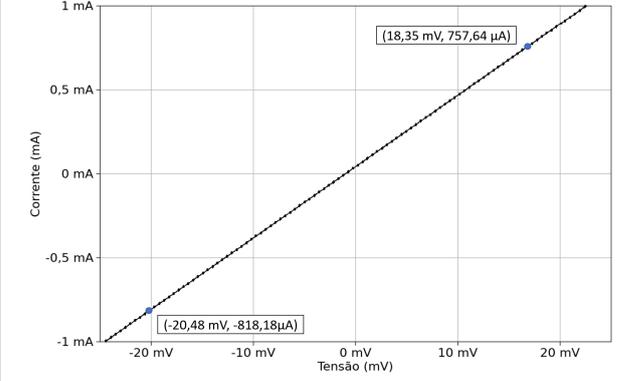
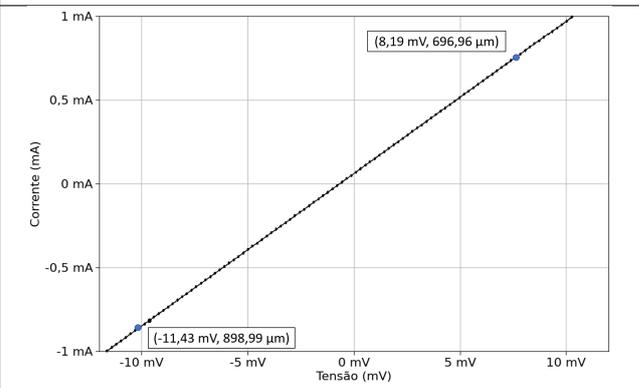
Al, nos quais é possível observar o predomínio do Al. Não foi possível identificar o filme fino de TiO_2 provavelmente devido à espessura extremamente reduzida do filme em conjunto com a superfície mais rugosa do Al. Para uma melhor identificação do filme fino, um ângulo rasante menor que 10° deveria ter sido adotado, o que aumentaria a sensibilidade da difração às camadas superficiais do material e possivelmente, identificando o TiO_2 .

4.5 AVALIAÇÃO DAS MEDIDAS ELÉTRICAS

Aqui serão apresentados os resultados da análise de resistividade de quatro amostras nos filmes finos de titânio. A resistividade elétrica é um parâmetro fundamental para avaliar a eficácia dos MARE, uma vez que ela impacta diretamente na capacidade do material dissipar energia eletromagnética na forma de calor (SOARES et al., 2021).

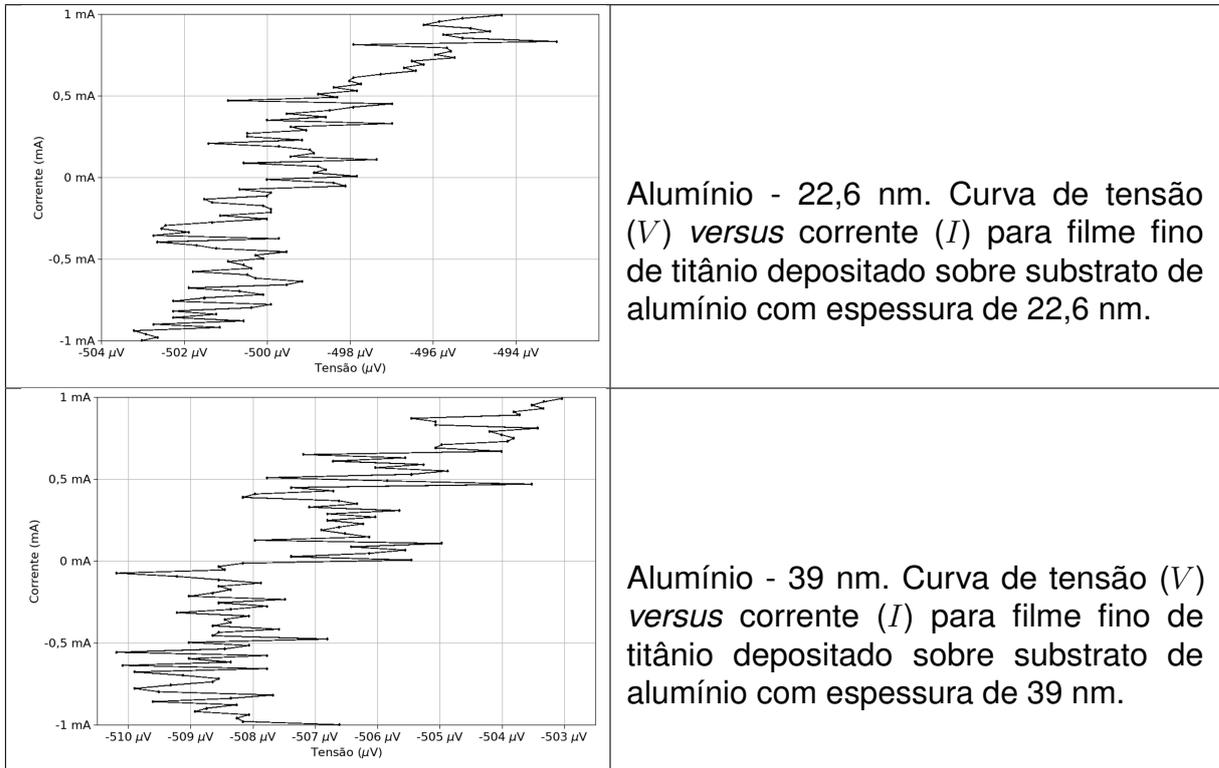
Os gráficos apresentados nas Tabelas 10 e 11 apresentam as curvas de tensão *versus* corrente ($V - I$) obtidas para cada filme estudado, possibilitando a análise das propriedades elétricas destes materiais e sua correlação com o substrato. Cada gráfico corresponde a uma medição específica, onde a inclinação da curva $V - I$ é empregada para calcular a resistência elétrica do material.

Tabela 10 – Curvas de tensão *versus* corrente ($V - I$) de filmes finos de titânio sobre substrato de polímero, com espessuras de 22,6 nm e 39 nm.

	<p>Polímero - 22,6 nm. Curva de tensão (V) <i>versus</i> corrente (I) para filme fino de titânio depositado sobre substrato de polímero com espessura de 22,6 nm.</p>
	<p>Polímero - 39 nm. Curva de tensão (V) <i>versus</i> corrente (I) para filme fino de titânio depositado sobre substrato de polímero com espessura de 39 nm.</p>

Fonte: O Autor, 2024.

Tabela 11 – Curvas de tensão *versus* corrente ($V - I$) de filmes finos de titânio sobre substrato de alumínio, com espessuras de 22,6 nm e 39 nm.



Fonte: O Autor, 2024.

A análise de resistividade de 4 pontas foi realizada aplicando uma corrente nominal variando de -1 mA a 1 mA, o que resultou em tensões na faixa de -20 mV a 20 mV para as amostras com substrato de polímero (PET) e de -510 μV a -490 μV para as amostras com substrato de Al.

Um comportamento não usual foi observado nos filmes finos depositados sobre substratos de Al, nos quais que todas as análises apresentaram curvas de tensão *versus* corrente não lineares. Esse comportamento indica que o material não segue a Lei de Ohm, possivelmente devido a efeitos como barreiras de contato. Um exemplo disso é a formação natural de óxidos na interface do Al como o Al_2O_3 , que pode resultar em um comportamento de semicondutor. A aplicação de tratamentos superficiais como polimento químico ou anodização controlada, pode ser uma estratégia para mitigar esses efeitos indesejados (RAMADE et al., 2023). Entretanto, tais técnicas não seriam aplicáveis nos filmes finos obtidos no presente trabalho.

No caso dos substratos de polímero, o comportamento linear das curvas $V \times I$ e as espessuras dos filmes (e) permitiram obter de forma direta e precisa a inclinação da reta correspondente, facilitando o cálculo da resistividade do filme que pode ser determinada a partir da Equação 21.

$$\rho = 4,5324 \cdot \left(\frac{V}{I}\right) \cdot e \quad (21)$$

Porém, para os substratos de Al, em que as curvas apresentaram um comportamento não linear, a resistividade (ρ) não foi calculada. Essa não linearidade pode ser atribuída, como mencionado anteriormente, a efeitos como a formação de camadas de óxidos na interface, variações de contato entre o filme fino e o substrato ou outros fenômenos associados à natureza metálica do Al. Essa complexidade demanda análises adicionais para interpretar os dados, considerando que o modelo linear tradicional não se aplica diretamente.

Mesmo as medições elétricas nos filmes finos depositados sobre os substratos poliméricos sendo consistentes com a Lei de Ohm, indicando que a variação da corrente com a tensão segue um padrão previsível de acordo com a resistência elétrica do material (LI et al., 2022). É possível identificar a presença de defeitos superficiais em ambos os substratos como mostrado nas Seções 4.2 e 4.3, defeitos esses que contribuem para o aumento da resistividade dos filmes, impactando diretamente a atenuação das ondas eletromagnéticas (QIN et al., 2022).

A Tabela 12 apresenta as medidas elétricas obtidas para os filmes finos depositados sobre os substratos de polímero. As medidas da resistividade dos filmes finos de Ti depositados sobre os substratos de alumínio não puderam ser obtidas em decorrência do comportamento não ôhmico apresentado.

A tensão resultante foi medida e utilizada para calcular a resistência elétrica (R) conforme a Lei de Ohm ($R = V/I$), a resistividade em folha (ρ_s) foi calculada a partir da Equação 22. Cabe ressaltar que o valor da profundidade de penetração da onda (δ) para os filmes de Ti depositados sobre polímero foi obtido utilizando-se a Equação 17 descrita anteriormente.

$$\rho_s = 4,5324 \cdot R \quad (22)$$

A permeabilidade magnética do vácuo (μ_0) é uma constante física universal com valor de $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} H/m$, sendo este adotado para os cálculos. Além disso, a partir da Equação 15 e com os valores de resistividade (ρ) calculados, obtém-se o valor da condutividade (σ).

Na Figura 31 observa-se um comportamento similar entre as curvas de profundidade de penetração da onda (δ) em relação à frequência. De maneira mais específica, à medida que a frequência aumenta, o valor da profundidade de penetração diminui. Como todos os filmes apresentaram esse mesmo padrão, decidiu-se neste

trabalho relatar a profundidade de penetração da onda apenas para as duas frequências extremas da faixa analisada, ou seja, 8 GHz e 12 GHz.

Tabela 12 – Valores de resistividade em quatro pontas (ρ), resistência (R), profundidade de penetração da onda (δ) para os filmes de Ti depositados sobre polímero com diferentes espessuras.

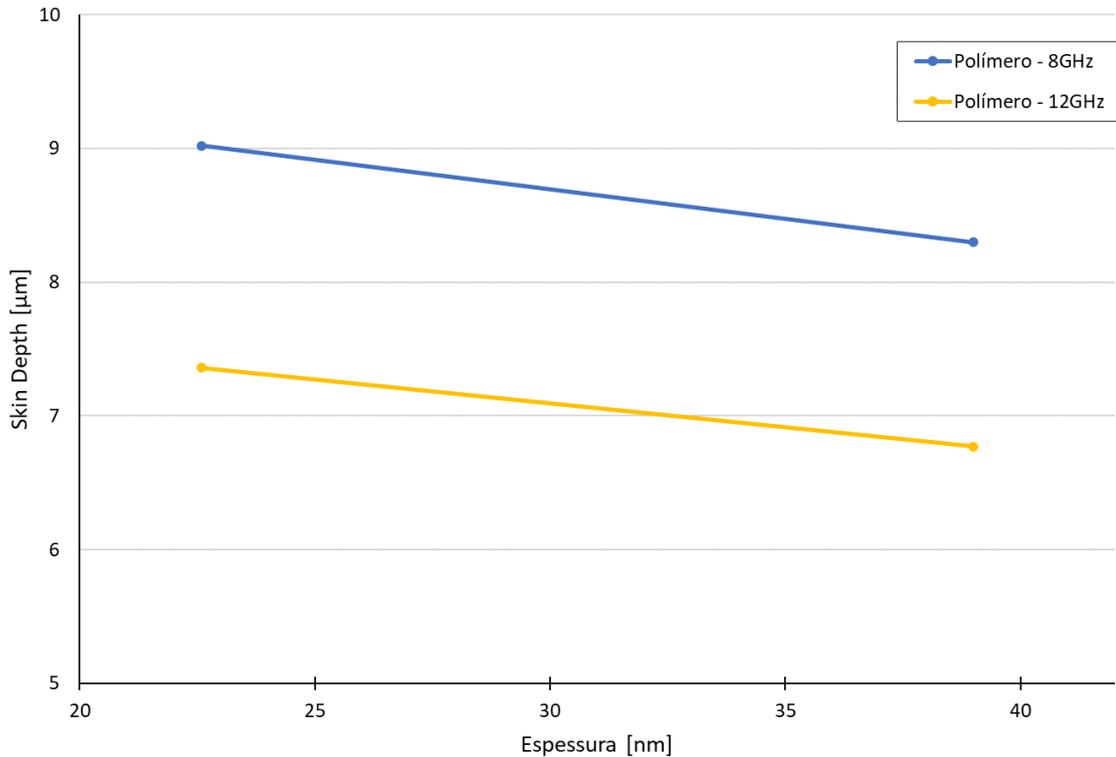
Espessura [nm]	R [Ω]	ρ_s [Ω/área]	$\rho \times 10^{-6}$ [$\Omega \cdot m$]	$\delta \times 10^{-6}$ [m] (f = 8GHz)	$\delta \times 10^{-6}$ [m] (f = 12GHz)
22,6	24,6	111,72	2,52	8,94	7,30
39	12,3	55,74	2,17	8,30	6,77

Fonte: O Autor, 2024.

A resistividade e a condutividade elétrica são grandezas inversamente proporcionais. Dessa forma, o aumento na espessura do filme contribui para uma redução na resistência à passagem da corrente elétrica pela superfície, resultando em uma menor resistividade. Consequentemente, ocorre uma redução na conversão da energia da onda eletromagnética em calor, o que está diretamente relacionado à capacidade dos filmes de Ti em atenuar a energia eletromagnética (SOETHE, 2009).

Considerando a teoria do *skin depth* apresentada na revisão bibliográfica e sua relação com a capacidade de absorção do material, é plotado o gráfico apresentado na Figura 28, que relaciona a profundidade de penetração (δ) da onda com a espessura dos filmes de Ti obtidos pela técnica de TMS.

Figura 28 – Curvas de espessura pelo Skin depth (δ) nos filmes com substrato de polímero.



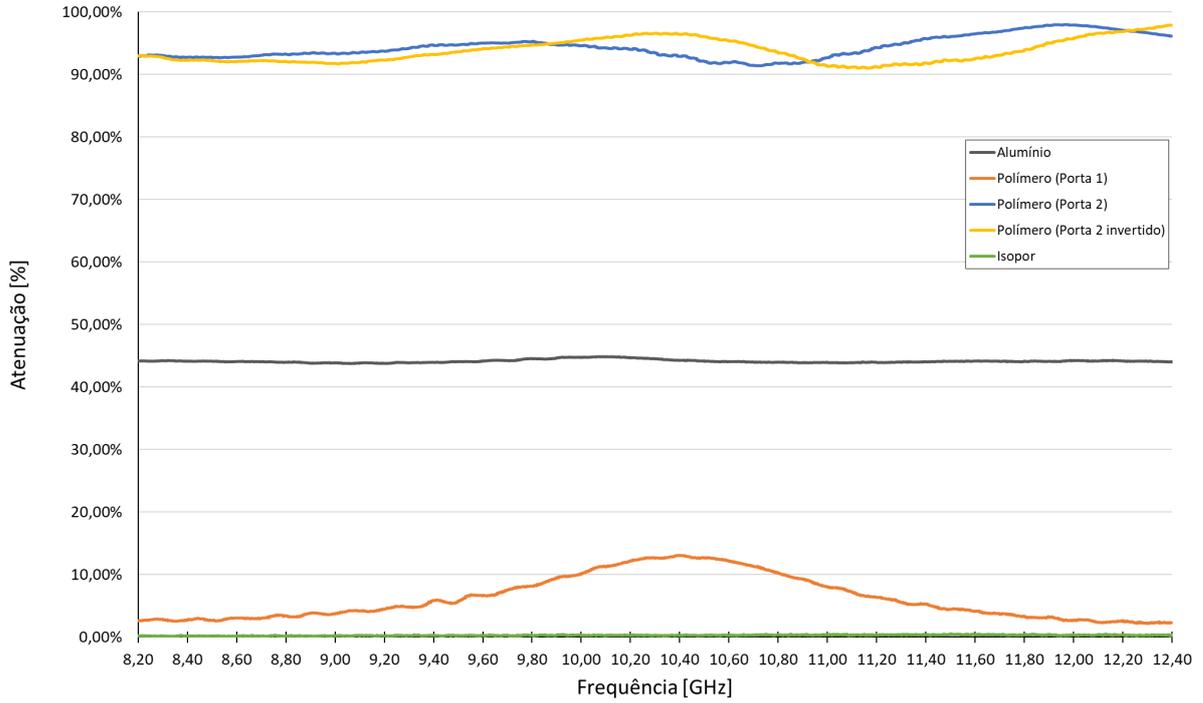
Fonte: O Autor, 2024.

A espessura do filme fino influencia diretamente na profundidade de penetração da onda eletromagnética, pois é um parâmetro usado no cálculo da resistividade (ρ), que por sua vez, influencia diretamente o valor de δ conforme descrito na Equação 17. Embora apenas dois pontos tenham sido analisados (22,6 nm e 39 nm), observa-se uma tendência de aumento de δ com a redução da espessura, o que está em concordância com os resultados apresentados por Soethe (2009).

4.6 CARACTERIZAÇÃO ELETROMAGNÉTICA

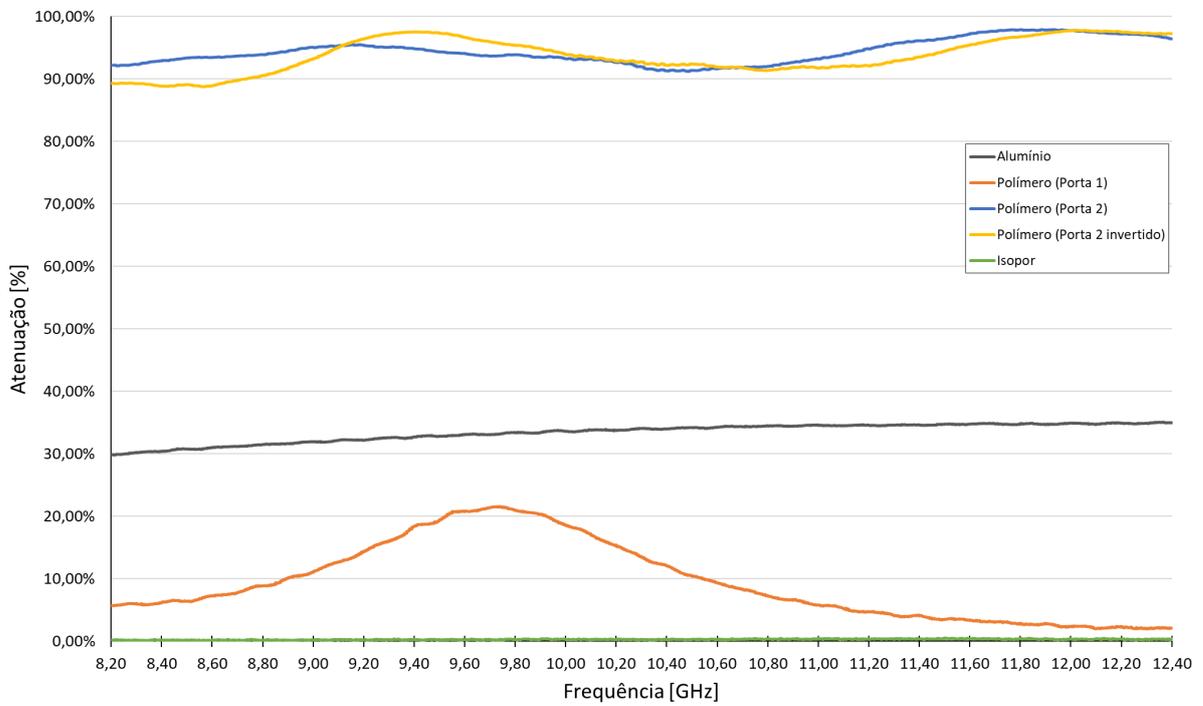
A análise da absorção eletromagnética foi realizada com base no balanço das energias incidente, refletida e atenuada, utilizando a matriz de parâmetros S obtida durante o processo de medição. As Figuras 29 e 30 ilustram a relação entre absorção e frequência para as quatro amostras estudadas (Al 22,6 nm; Al 39 nm; polímero 22,6 nm e polímero 39 nm). Além disso, foi incluída uma medição denominada “isopor”, material utilizado como suporte para as amostras de polímero no *offset* do guia de ondas. Dessa forma, é possível observar a influência do conjunto polímero-filme em comparação ao suporte.

Figura 29 – Curvas de atenuação dos filmes de Ti com espessuras de 22,6 nm.



Fonte: O Autor, 2024.

Figura 30 – Curvas de atenuação dos filmes de Ti com espessuras de 39 nm.



Fonte: O Autor, 2024.

Verifica-se, por meio das Figuras 29 e 30, que a característica de absorção dos

filmes finos obtidos apresenta para todas as espessuras de estudo, comportamento do tipo banda larga (tipo W) – uma vez que a absorção é praticamente constante em função da frequência.

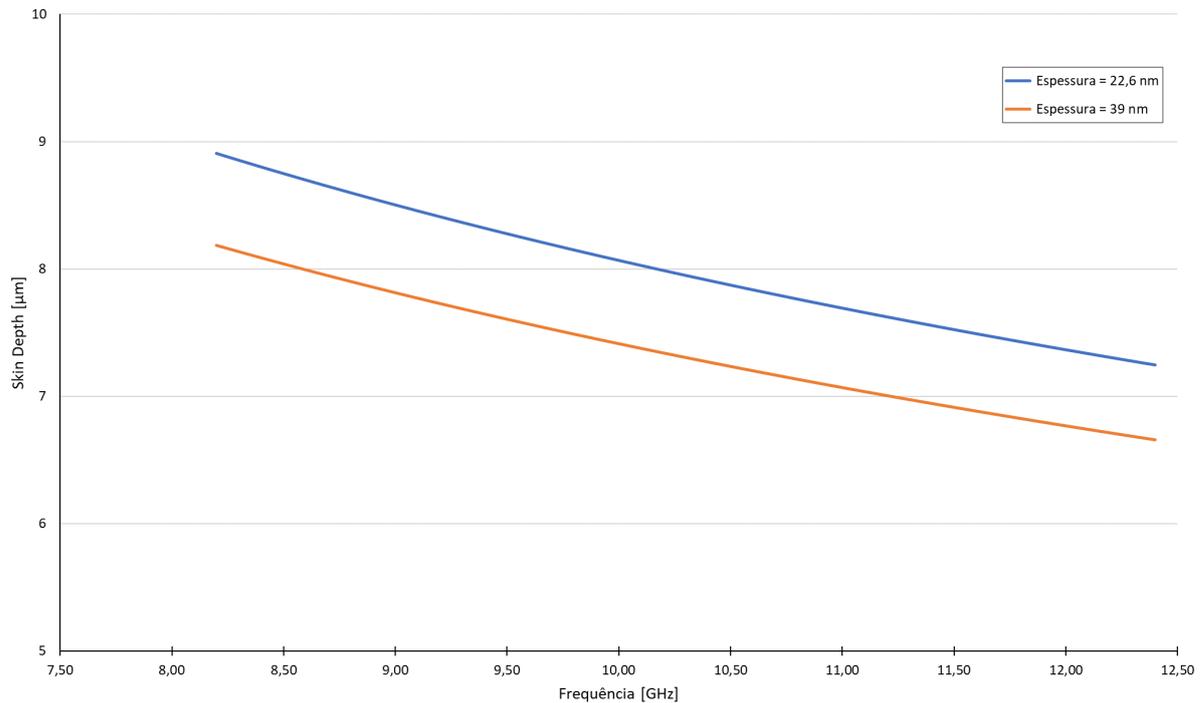
Filmes finos de Ti depositados sobre Al com espessura de 23 nm apresentaram uma atenuação em torno de 45%, enquanto os filmes com espessuras de 39 nm apresentaram uma atenuação na ordem de 35%. Em contraste, os filmes finos de Ti depositados sobre amostras de polímero alcançaram atenuações de até 95% ao longo de todo o espectro analisado, independentemente da espessura avaliada.

Conforme descrito na Seção 3.3.4, na configuração “Polímero Porta 1”, a amostra foi posicionada entre o *offset* e o adaptador, no lado mais próximo à Porta 1, estando o filme virado para Porta 1. Por outro lado, nas configurações “Porta 2” e “Porta 2 Invertido”, as amostras foram posicionadas entre o *offset* e o adaptador, no lado mais próximo à Porta 2, porém na configuração “Porta 2” o filme ficou virado para a Porta 2 enquanto em “Porta 2 invertido” o filme estava virado para a Porta 1.

Assim, a única mudança foi a distância percorrida pela onda, em duas medições tendo o acréscimo da espessura da peça *offset* do guia de ondas. Isso pode indicar que o efeito Salisbury (Seção 2.2.2.5) é provavelmente o causador dessa diferença, já que a alteração no caminho percorrido pela onda pode ter levado a uma condição de cancelamento de fase entre as ondas refletidas da camada resistiva e aquelas refletidas do refletor metálico, resultando em interferência destrutiva (SAVILLE, 2005). Esse cancelamento de fase causa uma maior absorção da energia da onda, o que pode explicar a atenuação superior observada nas medições realizadas com a amostra posicionada perto da Porta 2, onde a interferência destrutiva foi mais eficiente.

A Figura 31 apresenta a redução da profundidade de penetração da onda à medida que a frequência aumenta para cada filme de Ti depositado sobre o polímero. O gráfico foi gerado com base na Equação 17, considerando frequências entre 8 e 12,4 GHz e os valores de condutividade elétrica específicos para cada uma das duas espessuras avaliadas. A análise revela que a relação entre a profundidade de penetração e a frequência é aproximadamente linear, apresentando um padrão semelhante para todos os filmes testados.

Figura 31 – Curvas de frequência pelo *Skin depth* (δ) dos filmes finos de Ti depositados em substrato de polímero.



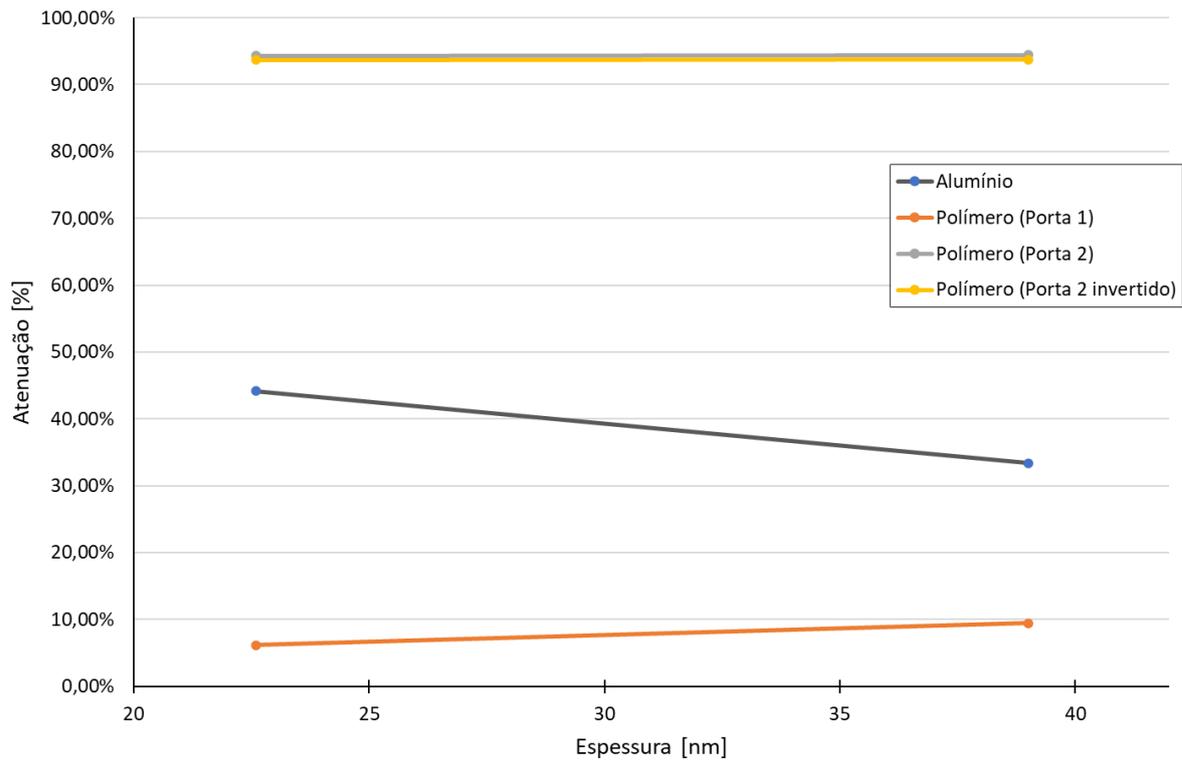
Fonte: O Autor, 2024.

O gráfico da Figura 31 mostra claramente que a profundidade de penetração da onda está associada à espessura do recobrimento.

Na Figura 32, observamos que para os filmes depositados sobre Al, quanto menor a espessura desses filmes, mais eficaz foi a atenuação da energia. Isso ocorre porque nesses filmes, a principal técnica de atenuação das ondas é a conversão de energia da onda em calor por meio das perdas magnéticas e dielétricas. Com a redução da espessura, a resistividade superficial aumenta, o que intensifica as perdas resistivas e favorece a dissipação de energia, tornando o processo de atenuação mais eficiente em filmes mais finos (SOARES et al., 2021).

Por outro lado, nos filmes depositados em substrato de polímero, o comportamento de atenuação se manteve constante ao longo de todo o espectro de frequências investigado. Esse comportamento pode ser explicado pelo fenômeno de cancelamento de fase, que ocorre devido à interferência destrutiva entre as ondas incidentes e refletidas. Em configurações como as de "Porta 2" e "Porta 2 Invertido", o efeito de interferência é a principal técnica de atenuação que não depende da espessura do filme ou da profundidade de penetração. Assim, o cancelamento de fase pode ser mais eficiente independentemente das variáveis associadas à espessura do filme (SAVILLE, 2005).

Figura 32 – Curvas de espessura por atenuação média dos filmes finos de Ti.



Fonte: O Autor, 2024.

A Tabela 13 apresenta os dados de atenuação da radiação incidente e os respectivos valores de espessura e de profundidade de penetração da onda para as frequências de 8 e 12 GHz.

Tabela 13 – Valores médios de atenuação e de profundidade de penetração da onda para os filmes de Ti.

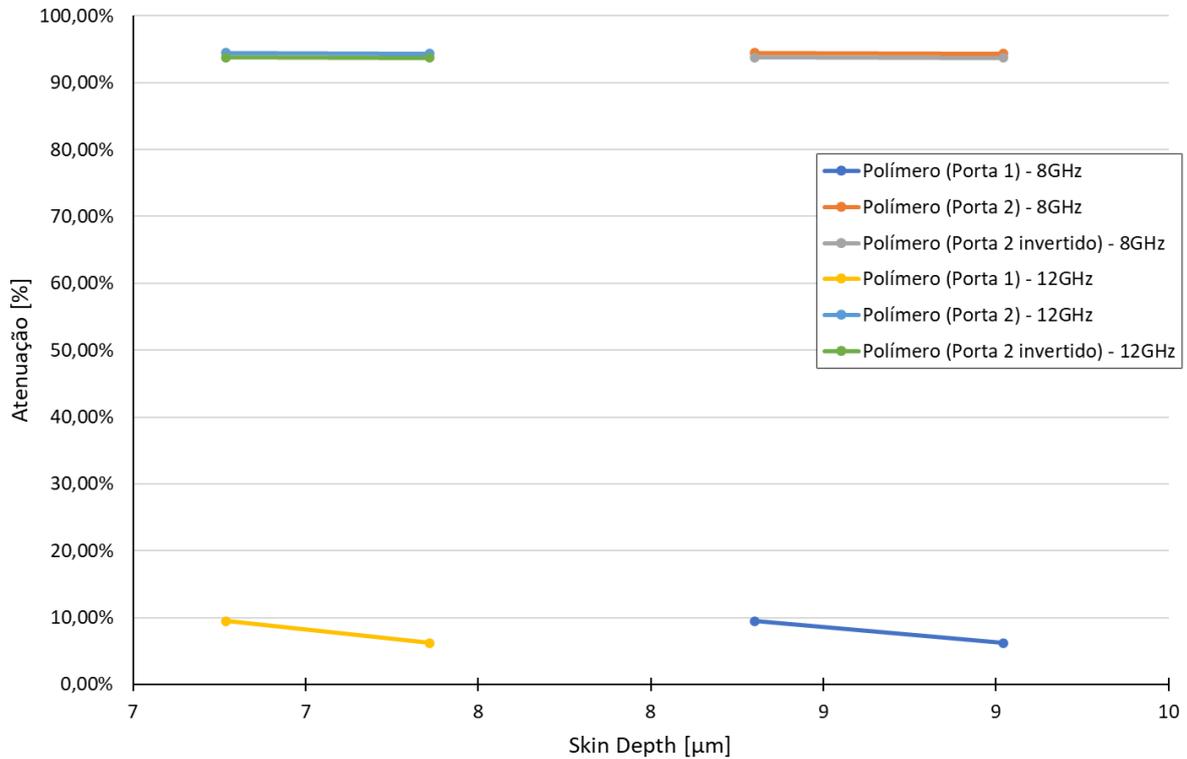
Amostra	Espessura [nm]	Atenuação média* [%]	$\delta \times 10^{-6}$ [m]	
			(f = 8GHz)	(f = 12GHz)
Al	22,6	44,16%	-	-
	39	33,42%	-	-
Polímero (Porta 1)	22,6	6,18%	9,02	7,36
	39	9,46%	8,3	6,77
Polímero (Porta 2)	22,6	94,36%	9,02	7,36
	39	94,46%	8,3	6,77
Polímero (Porta 2 invertido)	22,6	93,77%	9,02	7,36
	39	93,78%	8,3	6,77

*Atenuação - média de 1600 valores experimentais.

Fonte: O Autor, 2024.

Ao comparar o valor médio da atenuação dos filmes de Ti depositados sobre polímero em função da profundidade de penetração da onda nesses materiais, observa-se o comportamento mostrado na Figura 33.

Figura 33 – Curvas de Skin depth x atenuação média.



Fonte: O Autor, 2024.

Assim como observado na Figura 32, os resultados apresentados na Figura 33 podem ser explicados pela técnica de atenuação envolvida na medição com polímero na configuração Porta 1. Nesta medição, não foi utilizado o espaçamento adicional do *offset*, ao contrário das outras configurações. Como resultado, é provável que o cancelamento de fase e a interferência destrutiva não tenham ocorrido. Por essa razão, a atenuação variou em função da profundidade de penetração da onda, refletindo a ausência desse fenômeno de interferência e a atenuação sendo predominantemente causada pelas perdas resistivas.

Esses resultados são altamente promissores para aplicações em telecomunicações, radar e proteção contra radiação em geral. A seleção adequada da espessura do filme fino, aliada à escolha da melhor técnica de atenuação — entre o cancelamento de fase da onda incidente, o espalhamento da onda em várias direções e o uso de materiais com perdas eletromagnéticas (MARE) — otimiza a absorção de radiação, destacando a relevância desses materiais na tecnologia moderna.

5 CONCLUSÕES

Materiais tradicionais para absorção de radiação eletromagnética enfrentam limitações que dificultam sua aplicação em setores civis e militares. Filmes finos surgem como uma alternativa promissora para mitigar os efeitos de interferência eletromagnética, oferecendo absorção eficiente com espessuras na ordem de nanômetros. Este estudo investigou as propriedades e a influência do substrato em filmes finos de titânio produzidos por TMS, comparando características resistivas e de absorção eletromagnética.

Os filmes de Ti depositados sobre diferentes substratos apresentaram variações significativas na atenuação. Filmes sobre Al atingiram atenuações entorno de 45%, enquanto filmes sobre polímero alcançaram até 95% de atenuação. Fatores como a pureza do alvo do sistema TMS de deposição e a presença de gases residuais influenciaram o desempenho desses filmes.

A microscopia óptica revelou características morfológicas importantes dos filmes finos como defeitos superficiais e a continuidade dos filmes, mostrando que a deposição acompanha a superfície do substrato. Enquanto a análise por MEV forneceu detalhes sobre a estrutura e distribuição de partículas como a formação de manchas de deposição, complementando os resultados obtidos.

Além disso, os resultados indicaram que filmes finos apresentam boa absorção de micro-ondas quando possuem resistência elétrica média adequada. A atenuação da radiação nos filmes metálicos está relacionada com a formação de correntes superficiais que ao interagirem com impurezas e imperfeições, geram calor por efeito Joule.

Este trabalho reforça a literatura ao afirmar que a penetração da onda é favorecida quando a espessura do filme é inferior à profundidade de penetração da onda no material. A análise dos dados também sugere que a atenuação é eficaz quando há um bom ajuste entre a profundidade de penetração da onda e a resistência superficial do material.

A formação de óxidos na superfície dos filmes de Ti e em substratos metálicos como o Al está diretamente associada ao aumento da resistência elétrica e à maior atenuação da radiação. Esses óxidos desempenham um papel fundamental nas propriedades elétricas e na eficiência da absorção.

Para os filmes depositados sobre Al, observou-se que a atenuação das ondas eletromagnéticas foi mais eficaz em filmes de menor espessura. Esse comportamento é atribuído ao aumento da resistividade superficial com a redução da espessura, o

que intensifica as perdas resistivas e favorece a conversão de energia em calor. Esse resultado se deve à formação de filmes de TiO_2 sobre Al ou filmes de Ti sobre Al_2O_3 , configurando uma interface onde o material não é caracterizado como metal sobre metal, mas sim como metal sobre um óxido isolante.

O comportamento foi distinto na atenuação sobre polímero e Al. Nos filmes sobre substratos de polímero, com a principal técnica de atenuação sendo o cancelamento de fase, resultou em uma atenuação constante ao longo do espectro de frequências investigado, sem variações significativas com a profundidade de penetração da onda.

A escolha da técnica de atenuação adequada é crucial para otimizar o desempenho dos filmes em aplicações como telecomunicações, radar e proteção contra radiação. O cancelamento de fase, o espalhamento da onda e o uso de MARE mostraram-se técnicas promissoras com cada uma oferecendo vantagens dependendo das condições de operação.

Os resultados indicam que a combinação de material adequado, espessura do filme e técnica de atenuação eficiente pode levar a avanços significativos na área de absorção de radiação eletromagnética, oferecendo soluções mais eficazes para diversas aplicações tecnológicas.

Por fim, este estudo contribui para o entendimento das interações entre ondas eletromagnéticas e filmes finos, fornecendo subsídios para o desenvolvimento de novas tecnologias. A otimização desses parâmetros pode aprimorar o desempenho dos filmes em uma variedade de aplicações, destacando sua importância no cenário tecnológico atual e futuro.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os resultados obtidos na presente pesquisa sobre MARE, especialmente nos filmes finos de Ti abrem novas possibilidades de investigação. Entre as principais frentes de estudo destacam-se:

- Avaliar filmes finos absorvedores de radiação eletromagnética com diferentes substratos metálicos e com tratamentos superficiais de oxidação forçada ou lixamento para tratar rugosidade.
- Investigar MARE com o propósito de outras técnicas de atenuação das ondas eletromagnéticas, como a interferência destrutiva por cancelamento de fase e o espalhamento das ondas incidentes.
- Estudar multicamadas de filmes finos e sua eficiência como absorvedor de radiação eletromagnética, para investigar interações entre as camadas de materiais na atenuação da radiação.
- Aplicar o MARE estudado em alvos de geometrias complexas, protótipos, e determinar a seção reta radar em diferentes frequências e ângulos de aspecto.
- Avaliar o casamento de impedância entre MAREs multicamadas ou MAREs ressonantes absorvedores de um quarto de onda.

REFERÊNCIAS

- ARAUJO, A. P. U. et al. Utilização de técnicas eletroquímicas para caracterização e modificação de eletrodos. **Química Nova**, v. 25, n. 4, p. 639–650, 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422002000400019>.
- BONAGUIDE, G.; JARVIS, N. Architecture of the modern vector network analyzer. In: **The VNA Applications Handbook**. 1th. ed. Hoboken, NJ: Artech House, 2019. cap. 4, p. 95–127.
- BONAGUIDE, G.; JARVIS, N. Architecture of the modern vector network analyzer. In: **The VNA Applications Handbook**. 1th. ed. Hoboken, NJ: Artech House, 2019. cap. 1, p. 1–13.
- BOSSCHER, W. D.; BLONDEEL, A.; BUYLE, G. Uniformity control in sputter deposition processes. In: **45th Annual Technical Conference Proceedings, Society of Vacuum Coaters, Albuquerque (NM-USA)**. [s.n.], 2002. p. 135–141. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1854/LU-162152>.
- CADIRCI, S. **RF Stealth (Or Low Observable) and Counter-RF Stealth Technologies: Implications of Counter-RF Stealth Solutions for Turkish Air Force**. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia de Sistemas de Guerra Eletrônica), Naval Postgraduate School, Monterrey, 2009.
- CGEE. **Materiais avançados no Brasil 2010-2022**. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2010. 360 p. Il.; 24 cm. ISBN 978-85-60755-25-7.
- CHENG, D. K. **Field and Wave Electromagnetics**. Harlow: Pearson Education, 2014.
- COSTA, H. et al. Estudo comparativo entre técnicas de caracterização de materiais absorvedores de radiação eletromagnética (MARE) em micro-ondas. In: INSTITUTO FEDERAL DE SÃO PAULO. **Anais do Workshop de Micro-Ondas**. São Paulo: LabMax, 2020. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/357149710_ESTUDO_COMPARATIVO_ENTRE_TECNICAS_DE_CARACTERIZACAO_DE_MATERIAIS_ABSORVEDORES_DE_RADIACAO_ELETROMAGNETICA_MARE_EM_MICRO-ONDAS. Acesso em: 10 jun. 2023.
- FONTANA, L.; MUZART, J. Characteristics of triode magnetron sputtering: the morphology of deposited titanium films. **Surface and Coatings Technology**, v. 107, n. 1, p. 24–30, 1998. ISSN 0257-8972. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897298005763>.
- HALLIDAY, D. Eletromagnetic waves. In: **Fundamentals of Physics**. 8th. ed. Norwood, MA: Wiley, 2008. p. 1076–1103.
- HALLIDAY, D. Eletromagnetic waves. In: **Fundamentals of Physics**. 8th. ed. Norwood, MA: Wiley, 2008. p. 840–867.

KELLER, J. **Introducing the Army's latest high tech weapon.** 2024. Disponível em: https://www.fastcompany.com/91137663/army-using-microwave-technology-to-combat-drone-and-missile-threats?utm_source=the_news&utm_medium=newsletter&utm_campaign=11-06-2024. Acesso em: 03 out. 2024.

KNOTT, E. F.; SCHAEFFER, J. F.; TULEY, M. T. **Radar Cross Section.** Raleigh: SciTech Publishing, 2004.

LI, Q.; ZHU, L.; RUAN, H. Electromagnetic–thermo–mechanical coupling behavior of cu/si layered thin plate under pulsed magnetic field. **Acta Mechanica Solida Sinica**, v. 35, n. 100, p. 1860–2134, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10338-021-00250-y>.

MARINHO, C. S. **Caracterização de materiais absorvedores de ondas eletromagnéticas.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica), Centro de Engenharia Elétrica e Informática, Universidade Federal de Campina Grande, 2009.

MOURITZ, A. P. **Introduction to aerospace materials.** Philadelphia: Woodhead Publishing, 2012.

NOHARA, E. L. **Materiais absorvedores de radiação eletromagnética (8-12 GHz) obtidos pela combinação de compósitos avançados dielétricos e revestimentos magnéticos.** Tese (Doutorado em Ciência) - Curso Engenharia Aeronáutica e Mecânica, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2003.

NUSSENVEIG, H. M. **Curso de física básica 3 : Eletromagnetismo.** São Paulo: Edgar Blucher, 2015.

OHRING, M. **Materials Science of Thin Films: Deposition and Structure.** 2nd. ed. Hoboken, New Jersey: Academic Press, 2002. Department of Materials Science and Engineering, Stevens Institute of Technology.

OWENS, F. J.; POOLE, C. P. Electromagnetic absorption in the normal state. In: **Electromagnetic Absorption in the Copper Oxide Superconductors.** [S.l.]: Kluwer Academic Publishers, 2002. p. 75–94.

PANJAN, P. et al. Review of growth defects in thin films prepared by pvd techniques. **Coatings**, v. 10, n. 5, 2020. ISSN 2079-6412. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2079-6412/10/5/447>.

PEREIRA, J. J. **Caracterização eletromagnética de materiais absorvedores de micro-ondas via medidas de permissividade e permeabilidade complexas na banda X.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade de Taubaté, 2007.

POZAR, D. M. Microwave network analysis. In: **Microwave Engineering.** 4th. ed. [S.l.]: Wiley, 2012. p. 165–217.

QIN, M.; ZHANG, L.; WU, H. Dielectric loss mechanism in electromagnetic wave absorbing materials. **Advanced Science**, v. 9, n. 10, p. 2105553, 2022. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/advs.202105553>.

QUADROS, H. B. de. **Avaliação das características resistivas de filmes finos absorvedores de radiação eletromagnética**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Aeroespacial), Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, 2014.

RAMADE, A. M.; DELATORRE, R. G.; DUARTE, D. A. Effect of the oxidation of al substrates on properties of tio₂ films deposited by spin coating. **Brazilian Journal of Physics**, v. 54, n. 27, 2023. ISSN 1678-4448. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13538-023-01404-8>.

REJAS, P. E. B. **Filmes finos metálicos absorvedores de radiação eletromagnética aplicados à tecnologia furtiva**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Aeroespacial), Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, 2014.

RIVERA, L. M. **Estudo da influenciada modificação superficial nas propriedades dos filmes finos de Ti e Al absorvedores de radiação eletromagnética**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Aeroespacial), Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, 2022.

SAHOO, P.; SAINI, L.; DIXIT, A. Microwave-absorbing materials for stealth application: a holistic overview. **Oxford Open Materials Science**, v. 3, n. 1, p. itac012, 12 2022. ISSN 2633-6979. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/oxfmat/itac012>.

SARTALE, S.; ANSARI, A.; REZVANI, S.-J. Influence of ti film thickness and oxidation temperature on tio₂ thin film formation via thermal oxidation of sputtered ti film. **Materials Science in Semiconductor Processing**, v. 16, n. 6, p. 2005–2012, 2013. ISSN 1369-8001. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369800113002059>.

SAVILLE, P. Types of radar absorbing material. In: DEFENCE RD CANADA. **Review of Radar Absorbing Materials**. [S.l.], 2005. p. 62.

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

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

SITE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA. **Escudo eletromagnético: Película ultrafina absorve todas as frequências**. 2024. Disponível em: <https://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=escudo-eletromagnetico-pelicula-ultrafina-absorve-todas-frequencias&id=010115241106>. Acesso em: 7 nov. 2024.

SMITH, D. L. **Thin-Film Deposition: Principles and Practice**. New York City: McGraw-Hill, 1995.

SOARES, B. G.; BARRA, G. M. O.; INDRUSIAK, T. Conducting polymeric composites based on intrinsically conducting polymers as electromagnetic interference shielding/microwave absorbing materials—a review. **Journal of Composites Science**, v. 5, n. 7, 2021. ISSN 2504-477X. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2504-477X/5/7/173>.

SOETHE, V. L. **Deposição de filmes metálicos sobre Poli(Tereftalato Etileno) via Triodo Magnetron Sputtering: Influência da corrente e da voltagem nas propriedades dos filmes**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil, 2004.

SOETHE, V. L. **Filmes Finos Absorvedores de Microondas obtidos pelo processo de Deposição Física em fase vapor**. Tese (Doutorado em Ciência) - Curso de Física de Plasmas, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2009.

SOETHE, V. L. et al. Radar absorbing materials based on titanium thin film obtained by sputtering technique. **Journal of Aerospace Technology and Management**, v. 3, n. 3, p. 279–286, set./dez. 2011.

SOUZA, A. A. T. de. **Materiais absorvedores de radiação eletromagnética multicamada na faixa de frequência 12,4 A 18,0 GHz**. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2021.

TONG, C. EMI shielding materials and absorbers for 5G communications. In: **Advanced Materials and Components for 5G and Beyond**. Cham: Springer Nature Switzerland, 2022. p. 143–172. ISBN 978-3-031-17207-6. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-031-17207-6_6.

WANG, Y.-H.; LI, C.-C. Highly effective EMI shielding composites for 5G ka-band frequencies. **Applied Materials Today**, v. 36, p. 102041, 2024. ISSN 2352-9407. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352940723003104>.

ZIKIDIS, K.; SKONDRAS, A.; TOKAS, C. Low observable principles: Stealth aircraft and anti-stealth technologies. **Journal of Computations and Modelling**, v. 4, n. 1, p. 129–165, 2014.