

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

LARISSA MARTINS RIVERA

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA MODIFICAÇÃO SUPERFICIAL NAS PROPRIEDADES  
DOS FILMES FINOS DE TI E AL ABSORVEDORES DE RADIAÇÃO  
ELETROMAGNÉTICA.

Joinville

2022

LARISSA MARTINS RIVERA

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA MODIFICAÇÃO SUPERFICIAL NAS PROPRIEDADES  
DOS FILMES FINOS DE TI E AL ABSORVEDORES DE RADIAÇÃO  
ELETROMAGNÉTICA.

Trabalho apresentado como requisito para  
obtenção do título de bacharel no Curso de  
Graduação em Engenharia Aeroespacial do  
Centro Tecnológico de Joinville da  
Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador(a): Dr(a). Viviane Lilian Soethe  
Parucker.

Joinville

2022

LARISSA MARTINS RIVERA

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA MODIFICAÇÃO SUPERFICIAL NAS PROPRIEDADES  
DOS FILMES FINOS DE TI E AL ABSORVEDORES DE RADIAÇÃO  
ELETROMAGNÉTICA.

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), 29 de Julho de 2022.

**Banca Examinadora:**

---

Dr.(a) Viviane Lilian Soethe Parucker  
Orientador(a)/Presidente

---

Dr.(a) Rafael Galina Delatorre  
Co-orientador  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Dr.Moisés Luiz Parucker (a)  
Membro  
Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC

Dedico este trabalho à Deus, meu esposo e meus pais.

## AGRADECIMENTOS

Quando entrei na universidade senti que estava conquistando a maior realização da minha vida.

Foram longos anos, e nenhum deles foram fáceis. Eu não teria conseguido chegar até onde estou chegando, até onde já cheguei, se não fosse por pela maior ajuda que tive na minha vida. A de Deus.

Deus como um grande Pai, colocou pessoas na minha vida que a curto e longo prazo colaborariam para o meu crescimento e desenvolvimento, como mulher e como profissional Engenheira.

Deus me permitiu nascer de uma família incrível, que mesmo não tendo muito, sempre fez de tudo para que eu tivesse o que eu precisava. Meus pais, sempre me incentivaram a ser uma mulher grande, que conquista e não desiste, e com muita gana, estou aqui. Eles não duvidaram em nenhum momento do quanto eu poderia conquistar. Eles, mais que ninguém lutaram por mim, com sangue nos olhos, e não me permitiram desistir. Obrigada Ademir Martins e Aparecida de de Fatima C. Martins. Vocês NUNCA desistiram de mim.

Meu agradecimento, de todo meu coração aos meus irmãos, Jefferson, Wellington, Eliane, Jonathan e Rodrigo. Nesta caminhada vocês caminharam comigo, seja em palavras de animo em dias difíceis, seja nas orações de vocês, seja na ajuda financeira, seja na parceria para companhia e boas risadas. Obrigada meus irmãos!

Obrigada à minha prima Edilza, que dispôs os recursos financeiros para custear meus anos de graduação. Obrigada por confiar na minha capacidade e não desistir. Serei eternamente grata pelo quanto fez por mim.

Obrigada aos meus cunhados e meus sobrinhos, vocês sempre estiveram ao meu lado. Sempre proporcionando alegria e compartilhando do melhor dessa vida, me ensinando algo muito valioso, que é o tempo de qualidade com quem amamos.

Nesta caminhada também, surgiram muitos amigos que esticaram o braço para me ajudar a levantar, e me deram um ombro para chorar. Riram quando tinham que rir e se calaram quando precisaram se calar. A essência de cada um de vocês estará para sempre no meu coração. Obrigada aos amigos parceiros da graduação: Luis Gustavo, Sara Rosa, Giseli, Bruna, Alexandre, Michele, Rhayan e Debora.

Obrigada aos amigos que Joinville me apresentou: João Paulo, Kiane, Karine, Nicolly, Eduardo.

Agradeço aos professores Wagner Maurício, Diego Alexandre, Sérgio J. Idehara, Rômulo, Antônio Dourado e Rafael Cuenca do Campus CTJ, nestes anos me ensinaram com palavras de incentivo a nunca desistir. Me mostraram a minha capacidade como aluna e acreditaram no meu desenvolvimento. Muito Obrigada!

Agradeço especialmente a minha orientadora Viviane Lilian, que eu tive o prazer, por muita graça de Deus, conhecer nos últimos anos de graduação. A professora não me deixou desanimar em momentos difíceis, e mesmo com pouco, apostou com muita vontade na minha capacidade. Espero um dia alcançar um pouco do que sua caminhada já alcançou. A professora é, além de uma profissional admirável, uma mãe para seus alunos, que mostrou que aprender não é difícil. Obrigada!

Neste processo conheci meu precioso esposo, e deixei para agradecer ele no final. Nós já encaramos tantas batalhas, mas em todas estivemos segurando um a mão do outro. Você nunca duvidou de mim nesse caminho que escolhi, por graça de Deus, me mostrou a ter mais fé e esperar o tempo certo, e ele tem chegado, para todas as coisas. Obrigada por contribuir tanto no meu crescimento, eu te amo Victor Hugo.

Deixo aqui meus agradecimentos à todos que participaram da minha vida. Aqueles que não foram citados, mas em algum momento passaram por ela e deixaram uma semente que esta florescendo.

Obrigada Jesus, sem você nada disso, nem esses agradecimentos seriam possíveis!

*“A verdade é aquilo que resiste ao teste da experiência.”*

**Albert Einsten**

## RESUMO

Os Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética (MARE) são compostos que absorvem a radiação eletromagnética incidente, dissipando-as sob a forma de calor, através de processos intrínsecos de perda. Os MARE são amplamente utilizados na solução de problemas relacionados com processos de interferência e compatibilidade eletromagnética. Devido a dificuldade de utilização em sua forma volumétrica e a altas densidades, MAREs nas formas de filmes finos passaram a ser estudados. Análises comprovam que alterações na continuidade da superfície elevam a resistividade elétrica do material, influenciando na atenuação da radiação exibida pelo material. No presente estudo buscou-se compreender a influência das descontinuidades superficiais em filmes de Ti e Al, promovidos por meio de exposição a ciclos controlados de temperatura. Este aquecimento provocou o surgimento de tensões térmicas, efeitos que, por causa das diferenças dos coeficientes de expansão térmica do recobrimento e do material, causaram efeitos de compressão no filme, evidenciando, em grande parte das amostras, um defeito visual. De maneira geral, o aquecimento das amostras modificou a morfologia da superfície, porém com menores valores de atenuação, evidenciando que, há um limite na dimensão das descontinuidades geradas para que as mesmas possam atuar de forma positiva no processo de atenuação, sendo este efeito bastante visível nos filmes de Ti. Para analisar melhor estes resultados, as propriedades intrínsecas da permissividade elétrica e permeabilidade magnética dos filmes também foram analisadas. Os filmes utilizados neste trabalho procederam de pesquisa anterior desenvolvida em 2009. Estes mesmos filmes, sem nenhum tratamento foram analisados, novamente em 2022 e constatou-se a diferença no potencial de atenuação deste material ao longo destes treze anos. Os filmes finos utilizados no trabalho tiveram sua absorção medida em 2009, quando foram obtidos, e nesta pesquisa, em 2022. Os resultados de absorção nestes revestimentos após 13 anos evidenciaram uma elevação na atenuação dos filmes, tanto para o Ti quanto para o Al, fenômeno qual, esta atrelado ao surgimento dos óxidos nas superfícies dos filmes ao longo dos anos.

**Palavras-chave:** Material Absorvedor de Radiação Eletromagnética. Filmes finos. Substrato polimérico. Alumínio. Titânio. Defeitos.

## ABSTRACT

Radar Absorbing Materials (RAMs) are compounds that absorb incident electromagnetic radiation, dissipating them in the form of heat, through intrinsic loss processes. RAMs are widely used to solve problems related to interference processes and electromagnetic compatibility. Due to the difficulty of using it in its volumetric form and its high densities, RAMs in the forms of thin films started to be studied. Analyzes show that changes in surface continuity increase the electrical resistivity of the material, influencing the attenuation of the radiation displayed by the material. The present work aimed the understanding of the influence of surface discontinuities in Ti and Al films, promoted through exposure to controlled temperature cycles. This heating caused the appearance of thermal stresses, effects that, because of the differences in the coefficients of thermal expansion of the coating and the material, caused compression effects on the film, evidencing, in most samples, a visual defect. In general, the heating of the samples modified the surface morphology, but the attenuation orders were reduced, showing that there is a limit for the size of the grain boundary to act in a way that provides an increase in attenuation, it is possible to observe this effect, mainly, in Ti films. To assay better these results, the intrinsic properties of electrical permittivity and magnetic permeability of the films were also analyzed. That one, presented interesting results and modification of its complex components. The films used in this work came from previous research developed in 2009. These same films, without any treatment, were analyzed again in 2022 and the difference in attenuation orders over these thirteen years was verified. The absorption results in these coatings after 13 years showed an increase in the attenuation of the films, both for Ti and Al, a phenomenon which is linked to the appearance of oxides on the surfaces of the films over the years.

**Keywords:** Electromagnetic Radiation Absorbing Material. Fine films. polymeric substrate. Aluminum. Titanium. Defects

## Lista de Figuras

Figura 1 : Imagem ilustrativa da aeronave alemã Horten-Ho229 .....	21
Figura 2 : Imagem ilustrativa da aeronave SR-71 Blackbird.....	22
Figura 3 : Imagem ilustrativa da aeronave Have Blue .....	22
Figura 4 : Imagem ilustrativa da aeronave F117A .....	23
Figura 5 : Imagem ilustrativa da aeronave Northrop B-2 Spirit.....	24
Figura 6 : Imagem ilustrativa da aeronave B-1 B Lancer.....	24
Figura 7 : Suporte tipo planetário .....	28
Figura 8 : Processo de deposição por evaporação térmica.....	29
Figura 9 : Surgimento de tensões por contração térmica diferencial. ....	32
Figura 10 : Fluxograma com materiais e atividades.....	34
Figura 11 : Equipamento de deposição resistiva evidenciando a fonte de evaporação (cadinho) e o filamento de tungstênio.....	35
Figura 12 : Estufa de secagem.....	36
Figura 13 : Microscópio óptico utilizado nas análises dos filmes finos.....	37
Figura 14 : Analisador vetorial de redes com guia de onda acoplado para análise de absorção.....	39
Figura 15 : Amostra de Ti com 50,9nm: a) à temperatura ambiente 25°C; b) após aquecimento à 80°C; c) após aquecimento à 150°C. ....	40
Figura 16 : Amostra de Al com 50,8nm: a) à temperatura ambiente 25°C; b) após aquecimento à 80°C; c) após aquecimento à 150°C.....	40
Figura 17 : Amostra de Ti com 31 nm: a) sem tratamento à 25°C; b) após aquecimento à 110°C; c) após aquecimento à 150°C.....	42
Figura 18 : Amostra Al com 100,7 nm: a) sem tratamento à 25°C; b) após aquecimento à 110°C; c) após aquecimento à 150°C. ....	42
Figura 19 : Amostra de Ti com 50,9 nm: a) sem tratamento à 25°C; b) após aquecimento à 80°C; c) após aquecimento à 120°C; d) após aquecimento à 140°C.....	43
Figura 20 : Amostra de Al 50,8nm: a) sem tratamento à 25°C; b) após aquecimento à 80°C; c) após aquecimento à 120°C; d) após aquecimento à 140°C.....	43
Figura 21 :Atenuação da radiação eletromagnética dos filmes finos de Ti obtidos pela técnica de evaporação resistiva em 2009, e analisados em 2009.....	44
Figura 22 :Atenuação da radiação eletromagnética dos filmes finos de Al obtidos pela técnica de evaporação resistiva em 2009, e analisados em 2009.....	45

Figura 23 :Atenuação da radiação eletromagnética dos filmes finos de Ti obtidos pela técnica de evaporação resistiva em 2009, e analisados em 2022. ....	46
Figura 24 : Atenuação da radiação eletromagnética dos filmes finos de Al obtidos pela técnica de evaporação resistiva em 2009, e analisados em 2022. ....	47
Figura 25 : Atenuação eletromagnética dos filmes de Ti com 50,9 nm de espessura em função temperatura de tratamento. ....	48
Figura 26 : Atenuação eletromagnética dos filmes de Al com 50,8 nm de espessura em função da temperatura de tratamento. ....	49
Figura 27: Análise comparativa das atenuações dos filmes de Ti com 31nm de espessura antes e depois do aquecimento. ....	50
Figura 28 : Análise comparativa das atenuações dos filmes de Ti com 93nm de espessura antes e depois do aquecimento. ....	51
Figura 29 : Análise comparativa das atenuações dos filmes de Al com 12nm de espessura antes e depois do tratamento térmico máximo. ....	52
Figura 30 : Análise comparativa das atenuações dos filmes de Al com 50,8 nm de espessura antes e depois do aquecimento. ....	53
Figura 31 : Análise comparativa das atenuações dos filmes de Al com 100,7 nm de espessura antes e depois do aquecimento. ....	53
Figura 32 : Curvas de permeabilidade magnética e permissividade elétrica real e imaginária do filme de Ti com 31 nm: a) sem tratamento térmico; b) com tratamento. ....	54
Figura 33 : Curvas de permeabilidade magnética e permissividade elétrica real e imaginária do filme de Ti com 93 nm: a) sem tratamento térmico; b) com tratamento. ....	55
Figura 34 :Curvas de permeabilidade magnética e permissividade elétrica real e imaginária do filme de Al com 12nm: a) sem tratamento; b) com tratamento ....	56
Figura 35 :Curvas de permeabilidade magnética e permissividade elétrica real e imaginária do filme de Al com 50,8 nm: a) sem tratamento; b) com tratamento. ....	57
Figura 36 : Curvas de permeabilidade magnética e permissividade elétrica real e imaginária do filme de Al com 100,7 nm: a) sem tratamento; b) com tratamento. ....	58
Figura 37 :Comportamento da amostra do filme de Ti com 31 nm ao longo das temperaturas de: a) 25°C; b) 90°C; c)110°C; d)130°C; e)150°C. ....	68
Figura 38 : Comportamento da amostra do filme de Ti com 93 nm ao longo das temperaturas de: a) 25°C; b) 90°C; c)110°C; d)130°C; e)150°C. ....	68
Figura 39 : Comportamento da amostra do filme de Al com 12 nm ao longo das temperaturas de: a) 25°C; b) 90°C; c)110°C; d)130°C; e)150°C. ....	69

Figura 40 : Comportamento da amostra do filme de Al com 100,7 nm ao longo das temperaturas de: a) 25°C; b) 90°C; c)110°C; d)130°C; e)150°C..... 69

## LISTA DE ABREVIATURAS

<b>AC</b>	Corrente Alternada
<b>CTJ</b>	Centro Tecnológico de Joinville
<b>CVD</b>	Chemical Vapour Depositon
<b>DC</b>	Corrente Continua
<b>EMI</b>	Electromagnetic interference
<b>INPE</b>	Instituto de Pesquisas Espaciais
<b>ITA</b>	Instituto Tecnológico Aeronáutico
<b>MARE</b>	Materiais Absorvedores de Radiação
<b>NVA</b>	Vector Networker Analyzer
<b>PVD</b>	Physical Vapour deposition
<b>RCS</b>	Radar Cross Section
<b>Ti</b>	Titânio
<b>IEAv</b>	Instituto de Estudos Avançados
<b>LEMA<sub>t</sub></b>	Laboratório de Ensino de Materiais

## LISTA DE SIGLAS

$E_a$  - Energia absorvida

$E_i$  - Energia incidente

$E_r$  - Energia refletida

$E_t$  - Energia transmitida

$f$  - Frequência

$M$  - Massa molecular

$nm$  - Nanômetro

$P_e$  - Pressão

$R$  - Taxa de evaporação

$T$  - Temperatura

$\alpha$  - Coeficiente de expansão térmica

$\delta$  - Skin depth ou camada pelicular

$\epsilon$  - Permissividade elétrica

$\epsilon'$  - Permissividade elétrica real

$\epsilon''$  - Permissividade elétrica imaginária

$\lambda$  - Comprimento de onda

$\mu$  - Permeabilidade magnética

$\mu'$  - Permeabilidade magnética real

$\mu''$  - Permeabilidade magnética imaginária

$\mu m$  - Micrômetro

$\rho$  - Resistividade elétrica

$\sigma$  - Condutividade elétrica

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>16</b>
1.1 OBJETIVOS .....	18
<b>1.1.1 Objetivo Geral</b> .....	<b>18</b>
<b>1.1.2 Objetivos Específicos</b> .....	<b>18</b>
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>19</b>
2.1 MATERIAIS ABSORVEDORES DE RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA .....	19
<b>2.1.1 Aplicação Civil</b> .....	<b>20</b>
<b>2.1.2 Aplicação na Aeronáutica</b> .....	<b>20</b>
2.2 FILMES FINOS ABSORVEDORES DE RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA .....	25
<b>2.2.1 Princípio da Atenuação por Filmes Finos</b> .....	<b>25</b>
2.2.1.1 Permeabilidade e Permissividade .....	26
<b>2.2.2 Processo de Deposição dos Filmes Finos</b> .....	<b>27</b>
2.2.1.2 Processo de Evaporação .....	27
2.3 PROPRIEDADE DOS FILMES FINOS .....	29
<b>2.3.1 Propriedades Elétricas</b> .....	<b>30</b>
2.3.2 Propriedades Mecânicas .....	31
2.3.2.1 Tensões nos filmes .....	31
<b>3. METODOLOGIA</b> .....	<b>33</b>
3.1 SELEÇÃO DOS MATERIAIS .....	34
3.2 PROCESSO DE DEPOSIÇÃO .....	35
3.3 MODIFICAÇÃO DA SUPERFÍCIE .....	35
<b>3.3.1 Análise por Microscopia Óptica</b> .....	<b>37</b>
3.4 CARACTERIZAÇÃO DA ABSORÇÃO DA RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA POR GUIA DE ONDAS .....	38
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>40</b>
4.1 EFEITO DAS TENSÕES TÉRMICAS NOS FILMES .....	40
4.2 ANÁLISE POR MICROSCOPIA ÓPTICA APÓS AQUECIMENTO .....	41
4.3 AVALIAÇÃO DA ATENUAÇÃO DA RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA DOS FILMES FINOS DE AL E TI .....	43
<b>4.3.1 Atenuação decorrente do envelhecimento natural das amostras</b> .....	<b>44</b>
<b>4.3.2 Atenuação do conjunto de amostras expostas ao 2º tratamento</b> .....	<b>48</b>
<b>4.3.3 Atenuação do conjunto de amostras expostas ao 1º tratamento</b> .....	<b>50</b>

<b>4.3.4 Estudo dos parâmetros intrínsecos: permeabilidade elétrica e permissividade magnética do conjunto de amostras expostas ao 1º tratamento .....</b>	<b>54</b>
<b>5. CONCLUSÃO .....</b>	<b>60</b>
<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>62</b>
<b>6. REFERÊNCIA BIBLIOGRAFICA .....</b>	<b>63</b>
<b>ANEXO I.....</b>	<b>68</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Durante as duas grandes guerras mundiais, houve grandes inovações tecnológicas no setor militar, motivadas pela necessidade de desenvolvimento de máquinas e equipamentos de uso estratégico no setor de defesa. Estas inovações trouxeram ganhos para a indústria e comunidade civil. Exemplos de inovações podem ser encontradas, especialmente no setor de defesa, como por exemplo as tecnologias militares, como radares, aviônica, hidráulica, aerodinâmica entre outras (SOETHE, 2009).

No setor militar, com o objetivo de atenuar a energia espalhada por um alvo, frequentemente são utilizados Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética (MARE), que minimizam a visibilidade de um objeto ao radar (FREIRE et al., 2017).

Este tipo de tecnologia é conhecida como *stealth* (furtiva) e é considerada estratégica no desenvolvimento de muitos países. Basicamente, esta baseia-se na utilização de diversas técnicas de ocultação tornando, normalmente, os aviões e navios menos visíveis ao radar, sonar e câmeras de captação de *infrared* ou até mesmo o visual (BAGUDAI, 2013). No Brasil, nos setores aeronáuticos e naval, a utilização de MARE e o desenvolvimento da tecnologia são incentivados por grupos de pesquisas nacionais (SIMÕES, 2005).

Na área de telecomunicações, como sistema de comunicação de aeronaves e automóveis e na área de telefonia celular, bem como para o controle de processos de interferência e blindagem eletromagnética verifica-se uma larga utilização dos MARE (NOHARA, 2003).

O presente trabalho aborda como tema principal o desenvolvimento de materiais absorvedores de radiação eletromagnética (MARE). Os MAREs são materiais que possuem compostos que realizam as perdas de energia da radiação eletromagnética em suas determinadas faixas de frequência. Estes possuem características específicas que consistem na absorção da energia diante da incidência de ondas eletromagnéticas (NOHARA, 2003; DIAS et al., 2000). Esses materiais intensificam a radiação da onda incidente, por meio de seus mecanismos internos, transformando a energia absorvida em calor. Os mecanismos podem ser de natureza física, química e/ou ambas (KIM; LEE; KIM, 2007).

Os materiais absorvedores de radiação eletromagnética convencionais na forma volumétrica podem ser obtidos a partir da impregnação de uma matriz polimérica com centros absorvedores de radiação (LAX, 1962). Esses mesmos materiais apresentam alto valor de densidade, difícil modelagem e uma espessura elevada (QUADROS, 2014).

Tais materiais podem apresentar características de perdas magnéticas, interagindo com o campo magnético da onda eletromagnética, como é o caso das ferritas, ou podem apresentar características de perdas dielétricas, que são os materiais que interagem com o campo elétrico da onda eletromagnética, como é o caso dos que são obtidos pelo uso de partículas de materiais carbonosos, por exemplo, negro de fumo ( LEE, 1991).

Uma outra forma de MARE que tem sido pesquisada baseia-se na análise de filmes finos metálicos absorverem radiação eletromagnética na faixa de frequência de microondas. Este tipo de MARE apresentam-se vantajosos em relação aos volumétricos, uma vez que possuem baixas espessuras, e por consequência um baixo peso, o que possibilita a diversidade e aumento de sua faixa de aplicação. Para esses materiais, com espessura reduzida, a resistividade apresenta um comportamento contrário ao que se observa em materiais encontrados na forma volumétrica (DA SILVA; FERREIRA, 2019).

A importância deste tipo de tecnologia pode ser observada como por exemplo, em um documento oficial emitido em 2004 pelo departamento de Defesa dos Estados Unidos da América no qual se destaca a produção dos filmes finos como tecnologia militar crítica de desenvolvimento para controle de assinatura radar de equipamentos (MILITARY CRITICAL TECHNOLOGY LIST, 2004)

De acordo com modelos teóricos apresentados por Fuchs, Sondheimer e Mayadas–Shatzkes, o aumento da resistividade para menores espessuras relaciona-se com o espalhamento de elétrons na superfície do filme e nos contornos de grãos (FUCHS, 1938; SONDHEIMER, 1952; MAYADAS; SHATZKES, 1970). Os materiais absorvedores metálicos na configuração volumétrica são conhecidos por refletirem a radiação eletromagnética, característica qual está associada às propriedades elétricas dos metais, onde na superfície interna do condutor encontra-se um campo elétrico nulo, onde atuando como espelho para a radiação eletromagnética, e refletindo-a (MAYES, 2006). Porém em espessuras finas, da ordem de nanômetros, por exemplo, a absorção da radiação é uma consequência direta da presença de defeitos e um valor elevado de resistividade. Por tanto, filmes finos metálicos se tornam interessantes para serem avaliados como MARE .

Considerando a importância do domínio tecnológico dos processos de absorção apresentados por MARE, o presente trabalho fez uso do material absorvedor, analisados na faixa de banda larga de 8 a 12GHz, de filmes finos de titânio e alumínio e suas respectivas propriedades de absorção (KNOTT; SHAEFFER; TULEY, 1985).

No presente estudo buscou-se avaliar a influência da alteração da superfície do filme, por intermédio da exposição dos mesmos à diferentes temperaturas, bem como investigar a

influência do processo natural de oxidação dos revestimentos na capacidade absorvedora de radiação eletromagnética dos mesmos.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Investigar a influência da modificação superficial de filmes finos na atenuação da radiação eletromagnética na faixa de frequência de micro-ondas com banda X (8-12GHz).

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Investigar o efeito das tensões térmicas nos filmes finos;
- Submeter os filmes a ciclos de aumento de temperatura;
- Analisar o efeito da temperatura nas características morfológicas da superfície dos filmes;
- Analisar microscopicamente o efeito das tensões geradas no filme, decorrentes do aquecimento;
- Analisar a influência do tempo de envelhecimento natural na atenuação da radiação eletromagnética apresentada pelos filmes estudados;
- Avaliar a atenuação da radiação eletromagnética nos filmes finos após o processo de aquecimento;
- Investigar o comportamento dos parâmetros intrínsecos de perda da permissividade elétrica e permeabilidade magnética dos filmes após aquecimento.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentados os principais conceitos teóricos utilizados no desenvolvimento do presente trabalho.

### 2.1 MATERIAIS ABSORVEDORES DE RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA

As primeiras pesquisas sobre MARE iniciaram pouco tempo depois da invenção do radar, em meados de 1930 e tiveram como principal motivação aplicações militares. As pesquisas visavam principalmente proporcionar a redução da seção reta do radar (*radar cross section*- RCS) dos veículos aéreos, fazendo com que fosse possível evitar que a onda do radar pudesse retornar completamente à antena emissora, tornando então uma aeronave indetectável (REJAS, 2014). De maneira geral, os MARE transformam a energia gerada da radiação eletromagnética em energia térmica, ou seja, é possível afirmar que a energia absorvida pelo material é liberada em forma de calor, o que torna o sinal que retorna ao radar de detecção muito menor (DIAS et al., 2000).

Os MAREs podem apresentar características absorvedoras de perdas magnéticas ou dielétricas. Os materiais de perdas magnéticas apresentam valores acima de 1 tanto para a componente elétrica ( $\epsilon$ ) como para a magnética ( $\mu$ ), ou seja, eles podem possuir tanto perdas magnéticas, fator que acontece quando o campo magnético da onda interage com os *spins* Como quanto por perdas dielétricas, fator que acontece quando ocorre a interação da componente elétrica da onda eletromagnética com os dipolos elétricos (SOETHE, 2009). Os MAREs de perdas dielétricas apresentam valores menores de permissividade elétrica real ( $\epsilon'$ ) e apresentam valores maiores de perdas ( $\epsilon''$ ), isso porque a onda eletromagnética incidente interage com os elétrons da estrutura (NOHARA, 2003).

Os materiais absorvedores apresentam diversas aplicações, tais como civis e militares, podendo ser destacado entre as mais exploradas a blindagem eletromagnética de equipamentos nos setores automobilísticos, aeronáuticos, militar e indústrias de componentes e eletroeletrônicos e sistema de comunicação sem fio (REZENDE et al., 2000).

O comportamento da atenuação produzida por um material absorvedor é classificado como sendo de banda estreita ou ressonante. As de tipo N (*narrow*) são classificadas como sendo de banda estreita e as do tipo W (*wide*), de banda larga. Os absorvedores tipo N,

apresentam seu comportamento por meio dos processos de interferência entre as ondas incidentes e refletidas (SOETHE et al., 2008). Os absorvedores do tipo W, apresentam absorção em banda larga de frequência, o que permite que sejam utilizados para inúmeras aplicações, como em seções de radar que operam em uma dada banda, como por exemplo, de 8 a 12 GHz (KNOTT; SHAEFFER; TULEY, 1985). A obtenção da atenuação da onda eletromagnética é baseada nas seguintes técnicas: cancelamento de fase da onda incidente, espalhamento da onda em várias direções e utilização de materiais com perdas eletromagnéticas inerentes à faixa de frequência de interesse (MARINHO, 2010).

Pesquisas e o desenvolvimentos de MARE no Brasil ainda são relativamente recentes. É possível notar esta situação avaliando-se o baixo número de material bibliográfico nacional disponível referente ao assunto, sejam impressos ou por meio eletrônico (REJAS, 2014).

### **2.1.1 Aplicação Civil**

Os MAREs possuem uma ampla utilização em aplicações civis, principalmente quando se trata da redução de problemas de incompatibilidade e interferências eletromagnéticas. É possível notar então, que qualquer objeto eletrônico, quando incidido por radiação eletromagnética e que possa apresentar comportamento anômalo, necessita da utilização de MARE, para que não venha comprometer a sua operação (MARINHO, 2010).

A aplicação deste tipo de material é bastante difundida na área de telecomunicações, na indústria de eletroeletrônicos e na área médica, quando são aplicados na blindagem eletromagnética de instrumentos (DIAS et al., 2000).

### **2.1.2 Aplicação na Aeronáutica**

Ao longo dos anos, com o desenvolvimento tecnológico, surgiram sistemas de radares, fator que causou a expansão da utilização humana do espectro eletromagnético. Para permanecerem "invisíveis" aos seus inimigos, hoje, os setores de defesa militar desenvolvem constantemente sistemas que reduzem as observações de seus equipamentos.

A furtividade dos aviões funciona da seguinte forma: o material que reveste a aeronave converte a energia eletromagnética emitida por radares inimigos em energia térmica, impedindo a reflexão de sinais e assim retarda a identificação dos aviões (REJAS, 2014).

Zikidis, Skondras e Tokas (2014) apresentaram uma breve perspectiva histórica, no âmbito de desenvolvimento aeronáutico por meio da utilização de MARE, iniciando com a

aeronave alemã Horten Ho 229, apresentada na Figura 1, primeira a ser construída com tecnologia furtiva, ainda no período da 2ª Guerra Mundial. Para tornar a aeronave capaz de absorver as ondas de radar, uma tinta de grafite especial era a ela incorporada, porém a aeronave não passou de um protótipo, nunca tendo de fato operado.

Figura 1: Imagem ilustrativa da aeronave alemã Horten-Ho229



Disponível em: <https://markosun.wordpress.com/2011/06/30/very-strange-looking-aircraft/>. Acesso em 12 de Julho de 2022.

O físico Russo Peter Ufintsev estudou o espalhamento das ondas eletromagnéticas, e em 1962 desenvolveu equações para a prevenção dos reflexos de ondas eletromagnéticas de formas bidimensionais (UFINTSEV, 1962). Baseado nesta teoria, concluiu-se que o retorno do radar se relaciona, com a configuração da borda do objeto e não de maneira significativa com o seu tamanho (ZIKIDIS; SKONDRAS; TOKAS, 2014).

Três principais aeronaves ficaram marcadas por apresentarem características com tecnologias furtivas na década de 70, sendo elas a aeronave britânica Avro Vulcan, e as aeronaves americanas que foram produzidas pela famosa Lockheed, chamadas de U-2 Dragon Lady e a SR-71 BlackBird, sendo esta uma das mais conhecidas e marcantes aeronaves. Uma imagem ilustrativa da SR-71 BlackBird pode ser observada na Figura 2.

Figura 2: Imagem ilustrativa da aeronave SR-71 Blackbird.



Disponível em: [flugzeuglexikon.com/Imperial%20War%20Museum/Lockheed%20SR-71%20Blackbird%20-%20U.S.%20Air%20Force/lockheed%20sr-71%20blackbird%20-%20u.s.%20air%20force.html](http://flugzeuglexikon.com/Imperial%20War%20Museum/Lockheed%20SR-71%20Blackbird%20-%20U.S.%20Air%20Force/lockheed%20sr-71%20blackbird%20-%20u.s.%20air%20force.html), acessado em 12 de Julho/2022.

Com o avanço da tecnologia computacional, durante os anos 70, engenheiros dos Estados Unidos, utilizaram os conceitos do trabalho de Ufimtsev e realizaram simulações computacionais. Em 1975, foram construídas duas aeronaves demonstrativas pela Lockheed. As aeronaves tinham os codinomes de Have Blue e uma imagem ilustrativa da mesma pode ser visualizada na Figura 3. As aeronaves foram perdidas em um incêndio dos motores durante o voo, mas, mesmo assim, o programa foi classificado como um sucesso, pois provou-se que um avião pode ser usuário da tecnologia furtiva (ZIKIDIS; SKONDRAS; TOKAS, 2014).

Figura 3: Imagem ilustrativa da aeronave Have Blue



Disponível em: <http://nhungdoicanh.blogspot.com/2012/02/lockheed-have-blue.html>, acessado em 12 de Julho 2022.

Com o sucesso da aplicação da tecnologia na aeronave Have Blue, em 1978 os EUA estabeleceram um contrato com a Lockheed no qual desenvolverem uma aeronave furtiva, posteriormente chamada de F-117A, apresentada na Figura 4. As faces com formatos incomuns controlavam a possível reflexão dos feixes de radiação incidente provenientes do radar. As superfícies curvas tinha como função promover um espalhamento da radiação em diversas direções (ZIKIDIS; SKONDRAS; TOKAS, 2014).

Figura 4: Imagem ilustrativa da aeronave F117A



Disponível em: <http://forum.plastibrasil.com/viewtopic.php?t=11152>, acessado em 12 de Junho/2022.

O F-117A teve o primeiro voo em 1981, mas a sua capacidade máxima de operação só foi alcançada em 1983. Foram construídas 64 (sessenta e quatro) aeronaves. O F117-A foi aposentado em 2008, após praticamente ter estado presente em todos os conflitos dos EUA. Com o desenvolvimento dessa tecnologia aplicada a aeronaves, em meio às pesquisas, o Batalhão de Defesa Área Sérvio iniciou pesquisas no sentido de desenvolver radares de maior detecção, o que implicou na única aeronave do F-117A abatida, na guerra de Kosovo (ZIKIDIS; SKONDRAS; TOKAS, 2014).

Após a ascensão da F-117A, os EUA decidiu investir no desenvolvimento de aeronaves bombardeiras de longo alcance, já que a F-117A era uma aeronave de curto alcance. Com isso, surgiu a aeronave bombardeira com tecnologia furtiva, subsônica e com 4 (quatro) motores, a Northrop B-2 Spirit, ilustrada na Figura 5. Posteriormente, foi criado o Rockwell

B1, aplicando os princípios referentes à capacidade furtiva do B-2, o que resultou em uma aeronave bombardeira subsônica chamada de B1-B Lancer, apresentada na Figura 6.

Figura 5: Imagem ilustrativa da aeronave Northrop B-2 Spirit



Disponível em: <https://www.nationalmuseum.af.mil/Visit/Museum-Exhibits/FactSheets/Display/Article/195832/northrop-b-2-spirit/>, acessado em 12 de Julho 2022

Figura 6: Imagem ilustrativa da aeronave B-1 B Lancer.



Disponível em: <https://www.airliners.net/photo/USA---Air/Rockwell-B-1B-Lancer/1513215/L>, Acesso em 12 de Julho de 2022.

Essas três últimas aeronaves apresentadas foram as que deram início ao desenvolvimento de aeronaves com tecnologia furtiva, com resultados satisfatórios (ZIKIDIS; SKONDRAS; TOKAS, 2014).

## 2.2 FILMES FINOS ABSORVEDORES DE RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA

A interação entre a radiação eletromagnética e o MARE na forma de filme fino está relacionada a um processo de perda que dissipa a energia da radiação incidente na forma de calor com base no efeito Joule (TAKIZAWA; HASHIMOTO, 1999, BOSEMAN; LIU; GILGENBACH, 2004). Essas perdas estão diretamente relacionadas à resistividade e a espessura. Para materiais com espessura reduzida, a resistividade apresenta um comportamento oposto ao observado em materiais na sua forma volumétrica. O modelo teórico proposto por Fuchs e Sondheimer e Mayadas-Shatzkes demonstra que o aumento da resistividade e a baixa espessura estão diretamente relacionados ao espalhamento de elétrons na superfície do filme e nos contornos de grão do material (FUCHS, 1938; SONDHEIMER, 1952; MAYADAS; SHATZKES, 1970).

Os materiais dielétricos convencionais, como por exemplo, negro de fumo, necessitam de espessuras da ordem de centímetros para apresentarem cerca de 50% da atenuação, enquanto que os materiais com perdas magnéticas, com poucos milímetros podem ter este mesmo nível de eficiência (SOETHE, 2009). Em 2009, Soethe desenvolveu um estudo, que é referência para este projeto e comprovou que filmes finos metálicos apresentam níveis de atenuação significativos, quando possuem espessuras da ordem de nanômetros (nm) (BHAT; DATTA; SURESH, 1998).

### 2.2.1 Princípio da Atenuação por Filmes Finos

Conforme mencionado anteriormente, parâmetros como permeabilidade magnética e permissividade elétrica permitem compreender os mecanismos de perda existentes na interação das ondas eletromagnéticas com os materiais (PEREIRA, 2007).

Quando uma onda incide sobre uma superfície, ela pode ser refletida, transmitida ou absorvida. Uma propriedade que permite verificar a reflexão da onda eletromagnética é a impedância. Esta é definida como a oposição total que um certo meio causa à passagem de uma corrente alternada a uma dada frequência (SOETHE, 2009).

No caso de filmes finos, o mecanismo de atenuação se dá pela formação de correntes superficiais induzidas, (CHENG,1992). Quando o material depositado apresenta espessuras inferiores a da espessura da camada pelicular ocorre a formação das correntes de Eddy na

superfície. As correntes de Eddy são fenômenos elétricos descoberto pelo físico Leon Foucault em 1851 (NUSSENZVEIGH, 1997). Estas correntes provocam a atenuação do campo elétrico e magnético ocasionando perdas ôhmicas acarretando na dissipação da energia induzida (CHENG,1992). A profundidade que estas correntes penetram na superfície é denominada de *skin delph* (camada pelicular) ( $\delta$ ). Essa propriedade pode ser avaliada por meio da Equação 1 (SOETHE, 2009; QUADROS, 2014).

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

Onde:

$f$ : Frequência

$\sigma$ : Condutividade

$\mu$ : Permeabilidade

Para que a energia cinética do material se converta em energia térmica, por efeito Joule, ocasionando na atenuação da energia, é necessário, que no material, existam pontos de espalhamento de elétrons, como mencionado anteriormente. Desta maneira, a presença de defeitos ou impurezas no filme contribui diretamente para o espalhamento, e para maior atenuação da energia que incide sobre ele. A atenuação da onda eletromagnética por filmes é dependente da resistência encontrada na superfície do filme (SOETHE,2009). O estudo da influência da formação de defeitos por meio do aquecimento controlado das amostras é foco do presente estudo.

### 2.2.1.1 Permeabilidade magnética e Permissividade elétrica

A permissibilidade elétrica relativa ( $\epsilon_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r''$ ) e a permeabilidade magnética relativa ( $\mu_r = \mu_r' - j\mu_r''$ ) relacionam-se com as propriedades intrínsecas do material, sendo importantes para compreender o comportamento do mesmo quando incididos por uma radiação eletromagnética (NOHARA, 2003). Como mencionado, a permissividade elétrica caracteriza a interação do material com o campo elétrico, e a permeabilidade magnética, por sua vez, com o campo magnético. Os termos de  $\epsilon_r'$  e  $\mu_r'$ , estão relacionados com o armazenamento da energia do campo elétrico e magnético, respectivamente e os termos  $\epsilon_r''$  e  $\mu_r''$  com as perdas.

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).

Para que um material com perdas dielétricas apresente uma absorção de energia significativa, é necessário que este possua elevados valores de  $\epsilon_r''$ . Para os materiais metálicos, geralmente o fator de perda é bastante acentuado, porém o fator de armazenamento irá depender das propriedades do filme, tais como espessura, tamanho de partículas, bem como a sua distribuição na matriz (SAVILLE, 2005; JANOS, 1994; HECK, 1992). Da mesma forma, para os materiais magnéticos, o tamanho das partículas magnéticas e sua distribuição em uma matriz, afeta diretamente as propriedades de atenuação da onda incidente (SAVILLE, 2005). De maneira geral, o que define a absorção do material são as componentes imaginárias de perdas do filme (LAX, 1962).

## 2.2.2 Processo de Deposição dos Filmes Finos

Os filmes finos podem ser obtidos, basicamente por meio dos processos de CVD (*chemical Vapour Deposition*) e PVD (*Physical Vapour Deposition*). Nos processos de CVD, é depositado um composto volátil em um substrato, no qual ocorrem reações químicas. Nesta técnica, os precursores, gás ou vapor, podem reagir ou se decompor no substrato pré-selecionado, que geralmente se encontram sob altas temperaturas e vácuo. No processo PVD, as partículas dos materiais que constituirão o filme são arrancadas por meio de processos físicos como, por exemplo, por meio de evaporação e impacto de partículas com alta energia (OHRING, 1992).

No presente trabalho, a obtenção dos revestimentos foi realizada por meio da técnica de evaporação, que é abordada de forma mais detalhada na sequência.

### 2.2.1.2 Processo de Evaporação

Os processos baseados na evaporação das partículas são conhecidos como processos de evaporação a vácuo. No processo de evaporação ocorre a deposição de filmes finos por meio do aquecimento do material quando este está em um ambiente sob baixa pressão. O material é aquecido e depois evaporado, tornando possível a sua deposição nos substratos e nas paredes da câmara de processo. A taxa de evaporação da fonte por unidade de área e por unidade de tempo  $R$  pode ser encontrada pela Equação 2 (GEORGE, 1992):

$$R = 5,83 \times 10^{-4} \cdot \sqrt{\frac{M}{T}} \cdot p_e \quad (2)$$

Onde:

T é a temperatura em K;

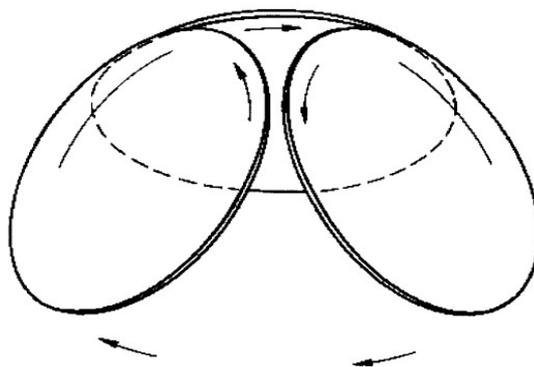
$p_e$  é a pressão de vapor em Torr;

M é a massa molecular do material evaporado;

O processo de evaporação permite a obtenção de altas taxa de deposição sem causar danos à superfície do substrato, sendo ideal para metalização de polímeros. Além disso, a utilização de baixa pressão na câmara permite uma redução nas contaminações do filme pelo gás residual, permitindo um controle da pureza do revestimento (TATSCH, 1996).

É possível obter a uniformidade da espessura do filme com a distribuição do substrato em um suporte tipo planetário, no qual o mesmo, durante o processo de evaporação, gira em torno do eixo vertical da câmara de processo, ao mesmo tempo que os vários suportes giram em torno do eixo secundário, como exemplificado na Figura 7.

Figura 7: Suporte tipo planetário



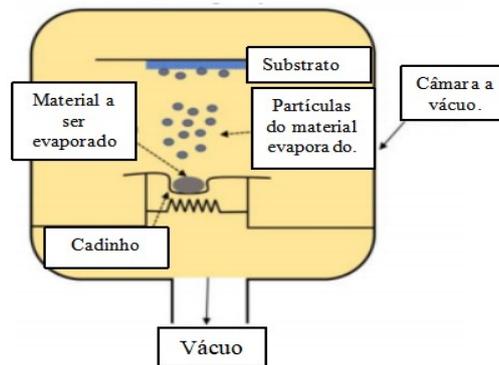
Fonte: TATSCH, 1996.

Existem alguns tipos de sistemas de evaporação, estes se diferem pela forma como aquecem, sendo os principais métodos: aquecimento indutivo, aquecimento por feixe de elétron e aquecimento resistivo, evaporação a laser, deposição por flash, a arco e aquecimento

por rádio frequência (SOETHE, 2009). No presente trabalho, utilizou-se o processo de evaporação por aquecimento resistivo.

Neste processo a passagem de uma corrente elétrica está condicionada à resistência elétrica, transmitindo calor ao material que será evaporado por meio do efeito Joule (passagem de corrente). O material que sofrerá a evaporação pode ser realocado no sistema de diversas formas. O suporte deste material apresenta diversas geometrias, mas comumente são produzidos no formato de arames ou chapas, sendo estes chamados de cadinhos. A figura 8 ilustra o sistema de evaporação resistiva. Quando o material a ser evaporado possui boa mobilidade, pode-se utilizar filamentos de tungstênio, molibdênio ou tântalo como resistência para o aquecimento (JENA, 2020). Uma forma de realizar a deposição do material na fase de vapor é fazer o uso de cadinhos na forma de chapas. A chapa possui uma concavidade inferior onde o material deve ser colocado. Após aquecido, este material é evaporado e então, posteriormente, é depositado sobre o substrato (SOETHE, 2009).

Figura 8: Processo de deposição por evaporação térmica.



Fonte: Jena, 2020.

Embora o processo seja considerado simples, a evaporação por aquecimento resistivo apresenta diversas restrições (TATSCH), tais quais:

- a) devido ao alto ponto de fusão, materiais metálicos refratários não podem ser evaporados;
- b) a evaporação do material que constitui o suporte pode provocar a contaminação do filme;
- c) a espessura do filme não pode ser controlada com precisão;
- d) a composição de ligas não pode ser controlada.

### 2.3 PROPRIEDADE DOS FILMES FINOS

A produção dos filmes finos visa promover, através de estruturas com dimensões inferiores a ordem volumétrica, materiais com propriedades singulares, específicas e distintas das apresentadas pelo mesmo na sua forma volumétrica, propriedades que em escala macrométrica, seriam impossíveis de serem obtidas. Tais propriedades interferem na eficiência e aplicabilidade dos filmes finos de forma significativa, sendo que algumas delas são discutidas na sequência.

### **2.3.1 Propriedades Elétricas**

Analisar as propriedades elétricas dos filmes finos é de grande importância, uma vez que esta se relaciona diretamente aos processos de atenuação eletromagnética.

A resistividade é uma das características mais importantes da análise elétrica do material. Na grande maioria dos materiais é possível observar valores elevados de condutividade elétrica. A resistividade e condutividade são grandezas inversamente proporcionais, sendo que os metais apresentam valores de condutividade da ordem de  $10^7 (\Omega \cdot m)^{-1}$  devido, principalmente ao número elevado de elétrons livres que o constituem. Os defeitos e impurezas cristalinas são classificados como centros de espalhamento para os elétrons livres no metal e o aumento do seu número, dependendo da quantidade de imperfeições e impurezas, causa o aumento da resistividade, ou seja, diminui a condutividade (SMITH, 1995).

Nos filmes finos, a resistividade é afetada pelas dimensões e estrutura do recobrimento. Normalmente, quando os filmes finos, tem espessuras inferiores a  $1\mu m$  apresentam a resistividade superior a apresentada pelo material na sua forma volumétrica (SOETHE, 2009).

Como citado anteriormente, os defeitos na rede cristalina atuam como espalhadores dos elétrons, afetando a resistividade do material de maneira significativa à temperatura ambiente quando a distância entre os defeitos é de ordem igual ou menor que o caminho médio livre dos elétrons. O aumento da resistividade se dá, possivelmente, devido aos defeitos pontuais, empilhamentos, contorno de grãos e átomos de impurezas não solúveis (MACHLIN, 1998).

Partindo desta análise, é possível afirmar que a resistividade dos filmes finos é inversamente proporcional à sua espessura e ao seu tamanho de grão, visto que os contornos de grão também atuam como pontos de espalhamento dos elétrons livres presentes no material (SMITH, 1995).

### **2.3.2 Propriedades Mecânicas**

Existem vários parâmetros que influenciam na determinação da microestrutura de filmes. A energia dos átomos ejetados da superfície do alvo e que são depositadas no substrato é um destes parâmetros. De acordo com o valor dessa energia, estes átomos podem eliminar ou até mesmo criar defeitos cristalinos, causar aumento ou diminuição da densidade do filme, aliviar ou aumentar a tensão residual, influenciando diretamente em várias propriedades do filme, como absorção, transmissibilidade e refletividade (QUADROS, 2014).

Outro fator que traz alterações significativas nas propriedades superficiais do filme é o aquecimento das amostras. O fenômeno de aquecimento afeta a morfologia e a microestrutura final do filme obtido (FONTANA; MUZART; WEINGAERTNER, 1995).

#### **2.3.2.1 Tensões nos filmes**

As tensões internas de um filme podem ser de caráter compressivo ou trativo. As tensões compressivas tendem a expandir de forma paralela à superfície do substrato. Em casos extremos pode acontecer a formação de saliências na superfície. Os filmes com tensões de caráter expansivo tendem a se contrair paralelo ao substrato, fenômeno que pode promover a formação de fissuras no material quando excedido o coeficiente de elasticidade (TATSCH).

A tensão total de um filme pode ser encontrada a partir da soma de todas as três tensões que ocorrem no mesmo:

- a) a tensão térmica;
- b) tensão externa;
- c) tensão intrínseca.

No âmbito dessa pesquisa, que se caracterizou pela mudança da superfície através da variação de temperaturas, a tensão analisada será a tensão térmica, que é de maneira geral resultado da diferença dos coeficientes de expansão do filme e substrato.

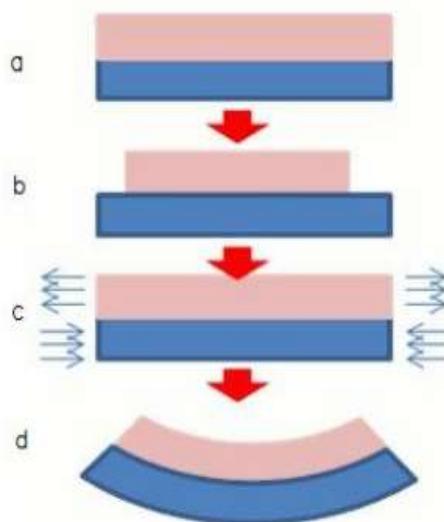
Um estudo de caso apresentado por Shen mostra a relação da tensão e temperatura de filmes finos durante ciclos de aquecimento. A tensão biaxial no filme é causada por incompatibilidade de expansão térmica entre o filme metálico e o substrato. Este estudo afirmou que, quando o filme fino se deforma apenas elasticamente, o aumento da tensão é contínuo até o ponto em que o material encontra uma temperatura que o estabilize, e não se

deforme mais, uma vez que a deformação do material está diretamente ligado com o surgimento das tensões (SHEN, 2010).

Quando uma amostra é aquecida, a curvatura dela muda, e isso acontece devido a diferença entre os coeficientes de expansão térmica ( $\alpha$ ) entre o substrato e o filme, ocasionando então as tensões sem a presença de forças externas. Essas tensões podem ser de caráter compressivo ou extensivo (COUTINHO, 2019). Quando o filme não se encontra aderido ao substrato, é possível constatar a mudança nas dimensões, quando a deformação expande as dimensões originais do filme. A Figura 9 ilustra o comportamento do filme após serem aplicadas tensões sobre ele.

Quando o filme expandido é novamente combinado com o substrato, produz uma aplicação de deformação necessária para forçar o filme a adotar as mesmas dimensões do substrato, provocando a geração de tensão dentro do filme. A tensão naturalmente armazenada tende a ser liberada a fim de atingir o equilíbrio, porém dependendo do grau de rigidez do substrato, grande parte dessa deformação pode ser absorvida quando o substrato for compatível, o que provoca uma flexão no sistema filme/substrato, ou quando o substrato tiver um valor alto de rigidez, o mesmo permanece inteiro no filme. Os meios pelos quais podem ser produzidas as deformações nos filmes são, basicamente, o método de deposição empregado e os efeitos térmicos induzidos (LAGATTA, 2011).

Figura 9: Surgimento de tensões por contração térmica diferencial.



Fonte: Hsueh; Evans, 1985.

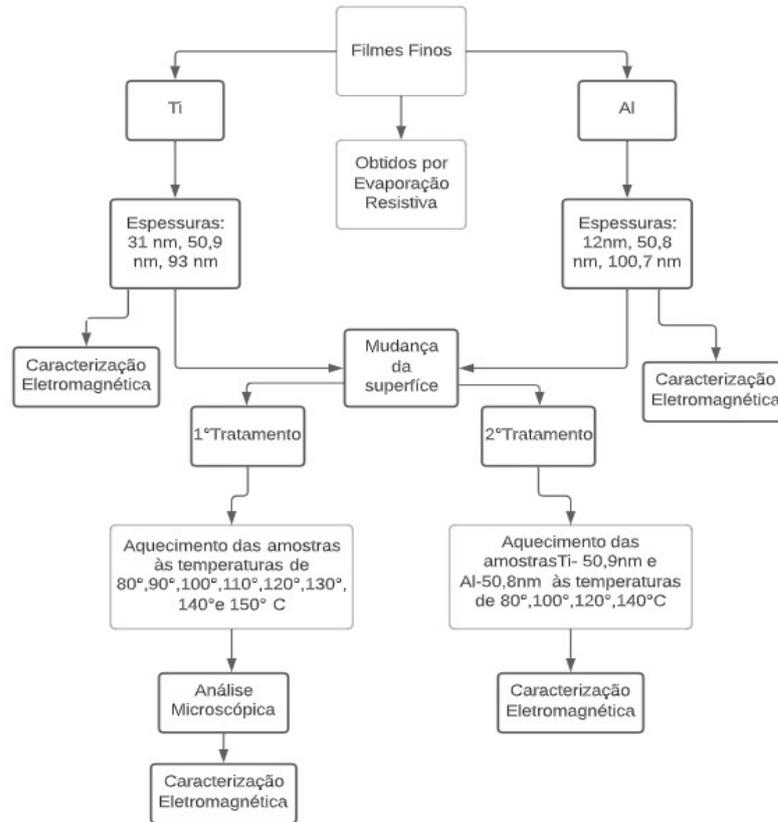
O efeito do diferencial da temperatura gerada nos filmes pode acontecer quando os mesmos são expostos a variações de temperatura pelo processo pós deposição, quando estes operam em altas temperaturas, e logo após o filme entrar em contato com o ambiente, ou pela imposição de maiores temperaturas ao filme, quando este estava em temperatura ambiente. A diferença entre os coeficientes de expansão térmica do substrato e do filme faz com que um se contraia mais que o outro. Tanto o substrato como o filme estão acoplados entre si, e, portanto, há o surgimento de tensões no conjunto, causando até mesmo deformações (HSUEH; EVANS, 1985).

O efeito da deformação na superfície do filme e a consequência da mesma na geração de defeitos na absorção da radiação eletromagnética também é estudado no presente trabalho.

### **3. METODOLOGIA**

Este capítulo apresenta os equipamentos e processos utilizados para a obtenção dos filmes finos metálicos depositados sobre substratos poliméricos. Para esse trabalho utilizou-se os filmes obtidos durante a tese de doutorado da Prof<sup>o</sup> Dr<sup>o</sup> Viviane Lilian Soethe Paruker, em 2009. Na Figura 10 é apresentado um fluxograma com as etapas da metodologia que compôs este trabalho.

Figura 10: Fluxograma com materiais e atividades.



Fonte: A Autora, 2022.

### 3.1 SELEÇÃO DOS MATERIAIS

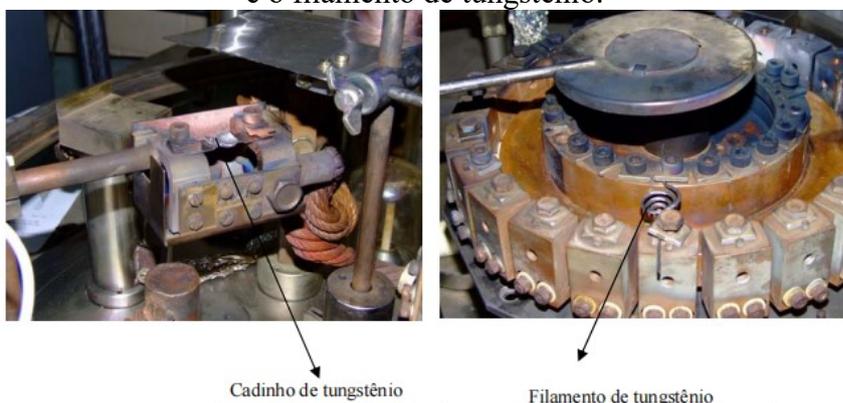
Para o recobrimento metálico utilizou-se de chapas de Ti e Al (SOETHE,2009). A pureza do Al e do Ti, foram de aproximadamente 99%.

Para a realização das deposições dos filmes de Ti e Al foram utilizados, respectivamente, substratos à base do polímero de engenharia denominado de poli(tereftalato de etileno), comercialmente conhecido como Mylar1000A com 0,1mm de espessura e Melinex com 1mm de espessura, ambos fornecidos pela empresa Dupont. Este polímero apresenta propriedades térmicas favoráveis ao processo de deposição em estudo, e possui ponto de fusão superior a 200°C, apresentando-se termicamente estável durante o processo de metalização (SOETHE, 2009).

### 3.2 PROCESSO DE DEPOSIÇÃO

As amostras dos filmes foram obtidas através do processo de deposição que utiliza a técnica de evaporação por aquecimento resistivo. O equipamento é de origem alemã da marca Veb Hochvakuum Dresden, que fica situada no Instituto de Estudos Avançados (IEAv). O sistema é alimentado por uma com corrente contínua (DC) e uma tensão fixada em em 5V, e uma corrente alternada (AC) de 0 a 400 A. No âmbito do processo de deposição, para fins de ajuste, utilizou-se filamentos de tungstênio, por serem materiais com baixo custo. A Figura 11 ilustra este sistema (SOETHE, 2009).

Figura 11: Equipamento de deposição resistiva evidenciando a fonte de evaporação (cadinho) e o filamento de tungstênio.



Fonte: Soethe, 2009.

A pressão base na câmara inferior foi de  $1.10^{-5}$  Torr com taxa de evaporação da ordem de 0,5nm/s. Os parâmetros de potência, corrente e tensão da fonte de evaporação foram alterados em função do volume do material dentro do cadinho, e foram modificadas no decorrer do processo de deposição. Desta forma, o substrato fica suspenso na parte superior do equipamento, fator qual, como citado anteriormente, dificulta a uniformidade da espessura. As espessuras dos filmes foram medidas por meio de uma microbalança de quartzo (SOETHE, 2009).

### 3.3 MODIFICAÇÃO DA SUPERFÍCIE

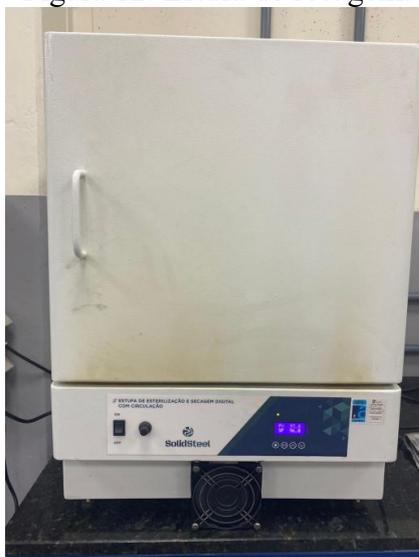
Partindo do entendimento de que, uma onda eletromagnética incidente possui sua energia reduzida pela modificação na estrutura do filme (QUADROS, 2014), as análises da modificação na superfície dos filmes foram realizadas de maneira que fosse possível avaliar a

propriedade morfológica e eletromagnéticas destes recobrimentos, e validar os efeitos desta modificação sobre essas propriedades.

Após o processo de obtenção dos filmes finos, por meio da técnica de deposição por evaporação resistiva, os filmes foram separados por amostras sendo classificadas por sua espessura. No 1º Tratamento foram utilizadas 3 (três) amostras de filmes de Ti e 3 (três) amostras de filmes de Al, tendo as amostras de Ti nas espessuras de 31nm, 50,9 nm, e 93nm e as amostras de Al espessuras de 12nm, 50,8nm, 107,0nm. A escolha destas amostras baseou-se nas características absorvedoras inicialmente conhecidas e na possibilidade de investigar a influência do tratamento na superfície em função da espessura de amostras do mesmo material. As amostras foram expostas à variação de temperatura de forma induzida, sendo aquecidas de forma gradual e controlada, utilizando-se uma estufa de secagem com controle de temperatura. Este primeiro estágio do tratamento chamaremos de **1º Tratamento**. O processo consistiu inicialmente na inserção das amostras em *backers* individuais e os mesmos foram colocados na estufa. As temperaturas foram incrementadas em 10°C a cada 15 (quinze) minutos. Após cada período, os *backers* que guardavam as amostras foram retirados, e a superfície das amostras foi analisada por microscopia óptica, para cada temperatura estudada. E a fim de abreviação, este processo foi nomeado de **ciclo de aumento da temperatura**. A temperatura inicial da estufa foi de 80°C e as amostras foram expostas até a temperatura de 150°C.

A estufa de secagem com circulação é da marca Solid Steel, e fica localizada no Laboratório de Ensino de Materiais (LEMAT) do Centro Tecnológico de Joinville (CTJ) na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e pode ser visualizada na Figura 12.

Figura 12: Estufa de secagem.



Fonte: A autora, 2022

O 2º Tratamento, fez-se o uso da mesma estufa de secagem utilizada no tratamento anterior. Para este tratamento contou-se com um conjunto de amostras que era composto por (quatro) amostras de Ti com espessuras de 50,9nm e 4 (quatro) amostras de Al com espessuras de 50,8nm. Este processo teve como objetivo comparar apenas as propriedades de absorção relacionadas ao material, uma vez que a espessura de ambos é próxima. Cada amostra de Ti e Al foi individualmente exposta a uma temperatura limitante de 80°, 100°, 120° e 140°C, por um período de 15 (quinze) minutos em cada processo. As amostras do segundo estágio do tratamento são classificadas como **2º Tratamento**.

### 3.3.1 Análise por Microscopia Óptica

Durante o 1º Tratamento, após cada ciclo de aumento de temperatura, a amostra foi retirada, resfriada e em seguida analisada por microscopia óptica.

Para a análise de microscopia óptica, foi utilizado o microscópio, da marca Kontrol, do Laboratório de Ensino de Materiais, no CTJ/UFSC. Uma foto do microscópio utilizado nas análises é apresentada na Figura 13.

As amostras foram analisadas microscopicamente em todo o ciclo de aumento da temperatura. Para certificar que a análise microscópica da amostra do filme estava sendo realizada em posições equivalentes, fez-se uma marcação nos revestimentos estudados.

Figura 13: Microscópio óptico utilizado nas análises dos filmes finos.



Fonte: A Autora, 2022

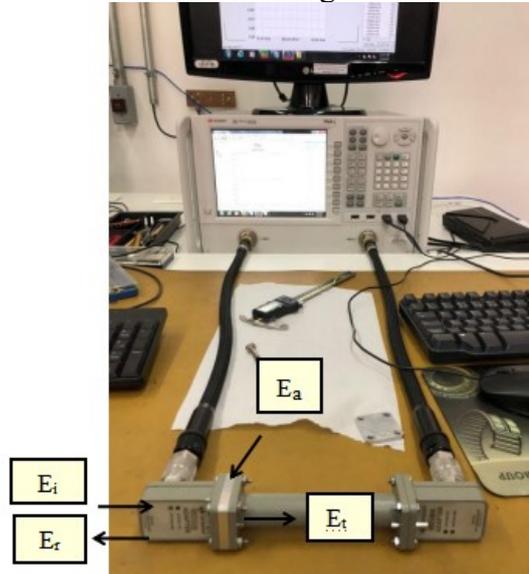
### 3.4 CARACTERIZAÇÃO DA ABSORÇÃO DA RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA POR GUIA DE ONDAS

Uma vez que os filmes finos de Al e Ti foram caracterizados como materiais absorvedores de radiação eletromagnética (SOETHE, 2009), a alteração na superfície morfológica destes filmes implica na avaliação da eficiência da atenuação do material e aferir suas propriedades absorventes. Para a caracterização da atenuação dos filmes, utilizou-se um analisador vetorial de redes com um guia de ondas acoplado. Neste método a onda eletromagnética é posicionada de forma que fique confinada em um guia metálico, onde a amostra a ser caracterizada é posicionada no seu interior. A análise pelo guia de ondas foi feita através do equipamento de análise de redes vetoriais, conhecido como Vector Network Analyzer (VNA) da Agilent Technologies- modelo PNA- Ln5235A, e localizado no Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE), em São José dos Campos- SP. Este equipamento pode ser visualizado na Figura 14.

Todos as amostras que foram submetidas ao 1° e 2° Tratamento, bem como amostras dos filmes sem tratamento foram analisadas utilizando o guia de ondas na faixa de frequências de 8 – 12 GHz, conhecida como banda X.

Pelo princípio da conservação da energia, a onda eletromagnética incidente ( $E_i$ ), pode ter a sua energia total ou parcialmente refletida ( $E_r$ ), atenuada ( $E_a$ ) ou transmitida ( $E_t$ ) por meio da estrutura do material. Uma ilustração destas energias que podem ser obtidas em um equipamento de guia de ondas é apresentada na Figura 14. Estes valores de energia são obtidos no equipamento de guia de ondas e tratados de forma a investigar a capacidade do material ensaiado minimizar o retorno de energia a fonte incidente.

Figura 14: Analisador vetorial de redes com guia de onda acoplado para análise de absorção.



Fonte: A Autora, 2022.

Os valores de energia fornecidos pelo equipamento são dados em dB, e para uma interpretação melhor dos resultados, os gráficos que abordarão a atenuação serão apresentados em percentagem. Para fazer a conversão destes valores, conforme apresentado por Soethe, 2009 e Rejas, 2014, faz-se o uso da seguinte Equação:

$$\text{Atenuação (\%)} = 100(1 - 10^{0,1\text{dB}}) \quad (3)$$

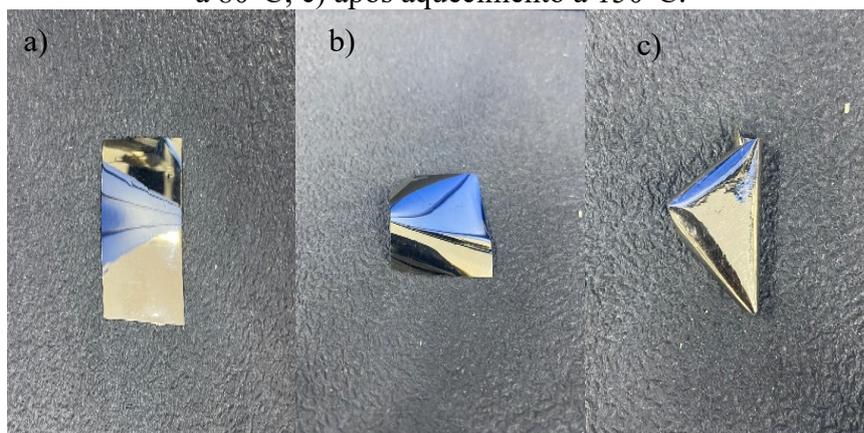
O equipamento apresenta valores de parâmetros importantes na caracterização eletromagnética dos materiais, os da permissividade elétrica relativa ( $\epsilon_r$ ) e permeabilidade magnética relativa ( $\mu_r$ ), que se relacionam com as propriedades intrínsecas do material. A permeabilidade e a permissividade, caracterizam a interação do material com a onda eletromagnética e com o campo elétrico, respectivamente, sendo importantes para compreender os mecanismos de perda do material estudado (NOHARA, 2003).

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 EFEITO DAS TENSÕES TÉRMICAS NOS FILMES

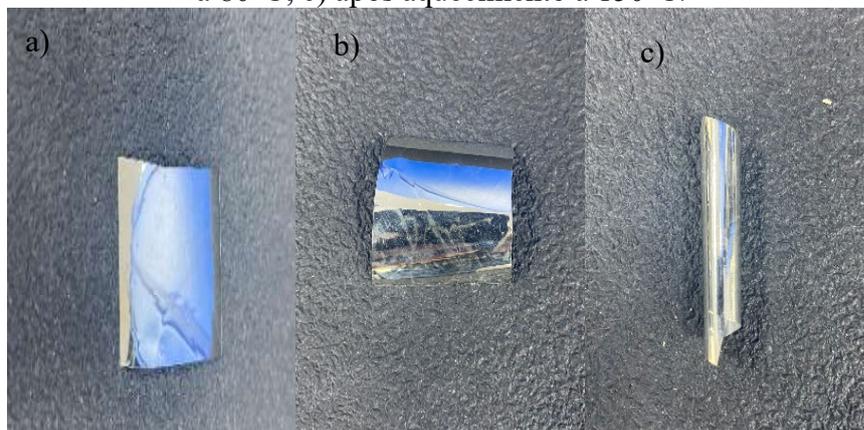
Como mencionado, quando o filme fino é exposto a variações de temperaturas, pela diferença do coeficiente de expansão do substrato e do material metálico, tensões térmicas são percebidas. Nas Figuras 15 e 16 é possível visualizar o comportamento do filme de Ti com 50,9 nm e Al com 50,8nm respectivamente, quando expostos aos ciclos de aumento de temperatura. Analisando estas amostras, observou-se que a temperatura na qual é possível verificar o início do processo de deformação no filmes é da ordem de 80°C, sendo que o filme foi exposto até a temperatura máxima, estabelecida para este trabalho, de 150°C.

Figura 15: Amostra de Ti com 50,9nm: a) à temperatura ambiente 25°C; b) após aquecimento à 80°C; c) após aquecimento à 150°C.



Fonte: A Autora, 2022.

Figura 16: Amostra de Al com 50,8nm: a) à temperatura ambiente 25°C; b) após aquecimento à 80°C; c) após aquecimento à 150°C.



Fonte: A Autora, 2022.

As amostras de Al para estas espessuras que, são próximas das do Ti, apresentaram maior efeito das tensões térmicas, sendo possível notar o encurvamento total da amostra na temperatura máxima.

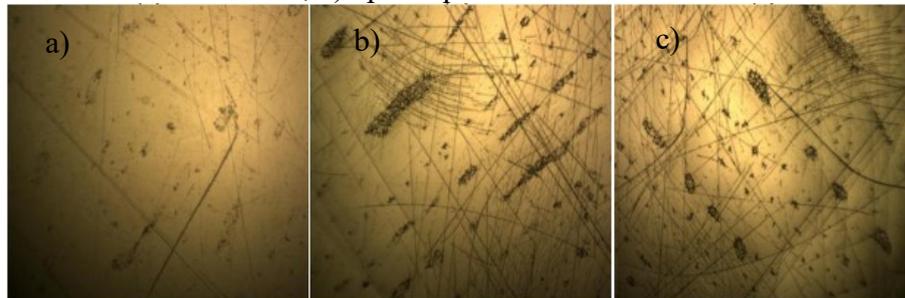
Todas as amostras, para as espessuras estudadas, foram analisadas de forma similar, sendo que estas análises e demais figuras que complementam essa pesquisa podem ser observadas no Anexo I do presente trabalho.

É possível notar que, quando, a amostra é exposta ao ciclo de aumento de temperatura, o efeito das tensões térmicas passa a ser visíveis por meio das deformações causadas ao filme. Essas tensões geradas, são visivelmente de caráter compressivo, e ficam mais perceptíveis conforme a temperatura aumenta. As deformações causadas na superfície do filme causam defeitos na microestrutura do filme, chamadas de “estrias”, e serão analisadas no próximo tópico.

#### 4.2 ANÁLISE POR MICROSCOPIA ÓPTICA APÓS AQUECIMENTO

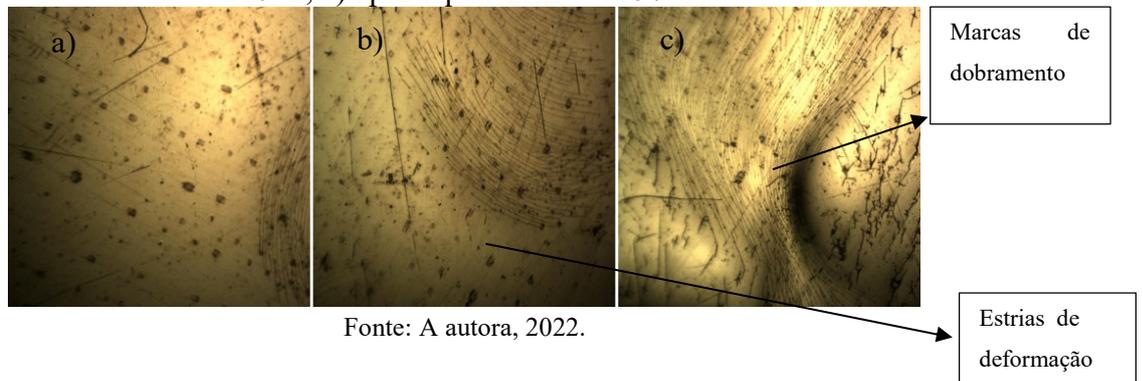
Para analisar o efeito do aquecimento na morfologia da superfície dos filmes finos estudados no 1º Tratamento e investigar possíveis alterações de continuidade provocada pelas tensões, realizou-se uma análise por microscopia óptica, com ampliação de 50X, em cada um dos revestimentos tratados, assim que o ciclo de aquecimento foi finalizado. Com base nas análises realizadas após o aquecimento térmico, foram escolhidas as amostras de Ti com 31 nm e Al com 100,7 nm, pertencentes ao primeiro conjunto de amostras. Estas foram selecionadas para serem analisadas pois, apresentaram maior encurvamento, como pode ser visto nas Figuras 36 e 39, no Anexo I-A e B. Com base nisto, as Figuras 17 e 18 ilustram, respectivamente, as micrografias obtidas dos filmes de Ti com 31nm e Al com 100,7nm, de modo a evidenciar a diferença da superfície das amostras sem tratamento à temperatura ambiente e após o aquecimento. As figuras 16b e 17b referem-se à condição na qual se observa o início da modificação da superfície.

Figura 17: Amostra de Ti com 31 nm: a) sem tratamento à 25°C; b) após aquecimento à 110°C; c) após aquecimento à 150°C.



Fonte: A autora, 2022.

Figura 18: Amostra Al com 100,7 nm: a) sem tratamento à 25°C; b) após aquecimento à 110°C; c) após aquecimento à 150°C.



Fonte: A autora, 2022.

É possível perceber pela análise microscópica, que com o aumento da temperatura de tratamento, as tensões térmicas ocasionadas na amostra do filme, geram “estrias”, uma espécie de segmentos irregulares e descontínuos ao longo da superfície da amostra. Nota-se que, por serem visíveis dessa forma, os defeitos na estrutura cristalina passam a ser de relativa ordem de grandeza. A figura 17 evidencia a dobra da amostra em função do aquecimento, é possível observar a alteração da morfologia e o surgimento de estrias.

No decorrer desta análise foi possível perceber que o filme Ti, em algumas espessuras, apresentou defeitos com temperaturas menores se comparadas as amostras de Al. As tensões e deformações do material estão diretamente relacionadas com as propriedades do mesmo. O Al é um material que apresenta maior ductibilidade que a do Ti, fator que influencia na deformação do material. Portanto, o Ti possui uma baixa capacidade ao estado de deformação elástica, ou seja, possui características mais frágeis.

Afim de relacionar os defeitos analisados com os valores obtidos da atenuação, que serão apresentados no próximo tópico, a Figura 19 apresenta a morfologia da superfície dos filmes de Ti com 50,9nm sem tratamento à temperatura ambiente e submetido ao aquecimento.

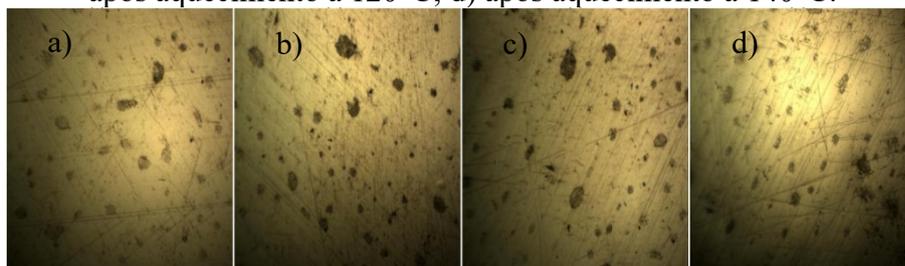
Além disso, a Figura 20 apresenta a evolução da morfologia da superfície dos filmes de Al com 50,8nm de espessura sem tratamento à temperatura ambiente e aquelas após aquecimento em diferentes temperaturas.

Figura 19: Amostra de Ti com 50,9 nm: a) sem tratamento à 25°C; b) após aquecimento à 80°C; c) após aquecimento à 120°C; d) após aquecimento à 140°C.



Fonte: A Autora, 2022

Figura 20: Amostra de Al 50,8nm: a) sem tratamento à 25°C; b) após aquecimento à 80°C; c) após aquecimento à 120°C; d) após aquecimento à 140°C.



Fonte: A Autora, 2022

Comparando-se as Figuras 18 e 19 é possível notar que os filmes de Ti apresentam maior quantidade de estrias que os filmes de Al. Das análises, pode-se perceber ainda que quando o filme é exposto a temperaturas mais elevadas, para espessuras maiores, verifica-se uma maior estabilidade conjunto filme/revestimento, que decorre da diferença de propriedades térmicas dos mesmos.

#### 4.3 AVALIAÇÃO DA ATENUAÇÃO DA RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA DOS FILMES FINOS DE AL E TI

Um dos objetivos do presente estudo é investigar a influência do aquecimento controlado na geração de defeitos na superfície dos filmes finos de Al e Ti e a consequente relação destas modificações nas propriedades absorvedoras de radiação eletromagnética na

faixa de frequência de microondas. Neste sentido, na sequência são apresentados os resultados de absorção dos filmes finos estudados, na seguinte ordem:

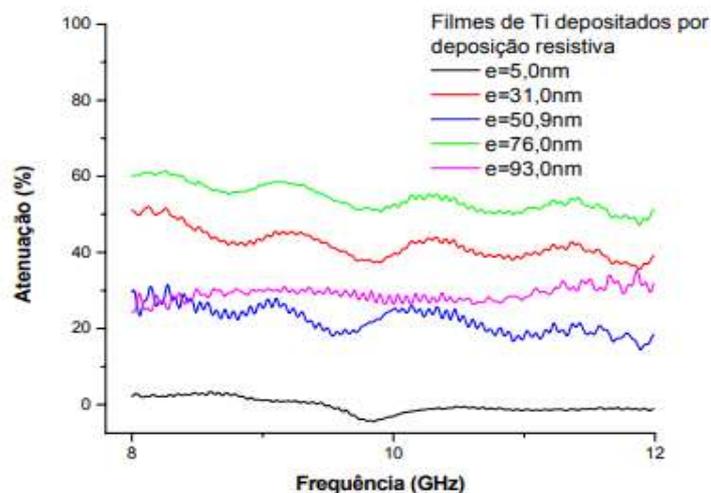
- Atenuação decorrente do envelhecimento natural das amostras;
- Atenuação do conjunto de amostras expostas ao 2º tratamento;
- Atenuação do conjunto de amostras expostas ao 1º tratamento;
- Estudo dos parâmetros intrínsecos: permeabilidade elétrica e permissividade magnética do conjunto de amostras expostas ao 1º tratamento;

#### 4.3.1 Atenuação decorrente do envelhecimento natural das amostras

Os filmes finos utilizados no desenvolvimento do presente trabalho, foram obtidos pelo processo de deposição por evaporação resistiva no ano de 2009 (dois mil e nove) e utilizados novamente em 2022 (dois mil e vinte e dois). A caracterização da atenuação dos revestimentos após 13 (treze) anos é apresentada neste tópico.

Os resultados de absorção da radiação eletromagnética dos filmes finos de Ti e Al, obtidos em 2009 por Soethe, são apresentados nas Figuras 21 e 22, respectivamente. Os filmes de Ti que foram utilizados na pesquisa anterior e que foram analisados nesta pesquisa são os de espessuras de 31 nm e 93 nm. Por outro lado, os filmes de Al que foram obtidos na pesquisa anterior e que foram utilizados no presente trabalho são os de espessuras de 12 nm, 50,8 nm e 100,7nm.

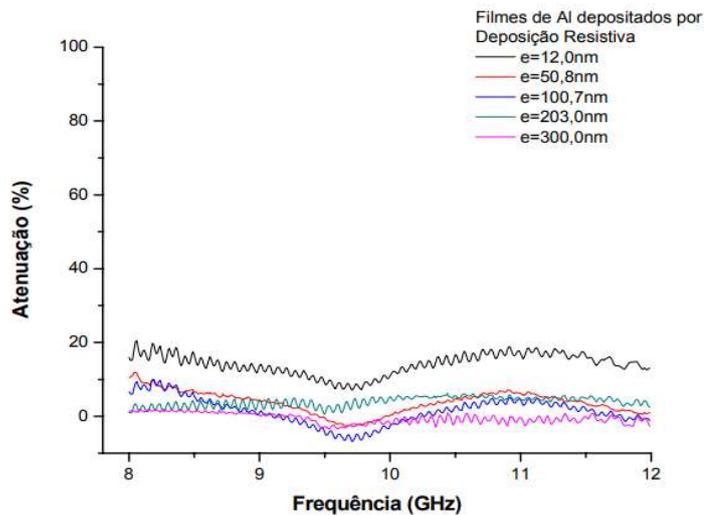
Figura 21:Atenuação da radiação eletromagnética dos filmes finos de Ti obtidos pela técnica de evaporação resistiva em 2009, e analisados em 2009.



Fonte: Soethe, 2009.

É possível notar que os valores das atenuações das amostras de Ti, com espessuras de 31nm são da ordem de 50% da atenuação, enquanto filmes com espessuras da ordem de 93nm apresentam atenuação de aproximadamente 30% em toda a faixa de frequências estudada.

Figura 22: Atenuação da radiação eletromagnética dos filmes finos de Al obtidos pela técnica de evaporação resistiva em 2009, e analisados em 2009.



Fonte: Soethe, 2009.

De maneira semelhante é possível visualizar os valores para atenuação que foram medidos no trabalho original para as amostras de Al. Os valores, de maneira geral, não ultrapassam 20% de absorção e possuem picos de redução da atenuação entre o intervalo de 9 a 10 GHz, comportamento característico de cancelamento de fases.

Na Tabela 1 são apresentados os valores das atenuações das amostras de Ti, sem tratamento, com espessuras de 31 nm e 93 nm medidos em 2022. Nota-se a diferença nos valores da atenuação de uma mesma amostra de filme, sem nenhum tratamento térmico ao longo destes treze anos.

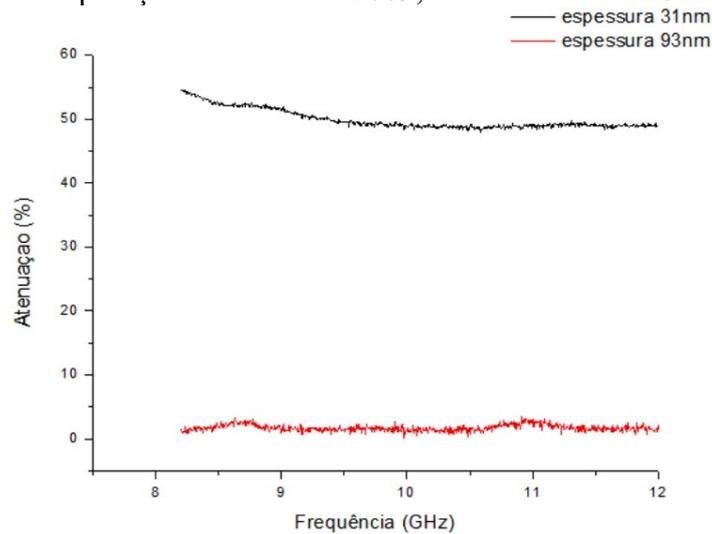
Tabela 1: Eficiência média da capacidade absorvedora dos filmes finos de Ti medidas em 2009 e 2022.

Material	Espessura(nm)	2009	2022
Ti	31nm	50%	55%
Ti	93 nm	30%	12%

Fonte: A autora, 2022.

A atenuação média do Ti com espessura de 93 nm apresentou uma queda de 20 % de seu valor quando comparada com valores encontrados em 2009. Em contra partida, as amostras dos filmes com 31nm não apresentou modificação significativa de absorção, ficando na ordem de 55% em toda a faixa de frequências analisada. A Figura 23 mostra a análise gráfica da atenuação do filme fino de Ti com 31nm e 93nm.

Figura 23:Atenuação da radiação eletromagnética dos filmes finos de Ti obtidos pela técnica de evaporação resistiva em 2009, e analisados em 2022.



Fonte: A autora, 2022.

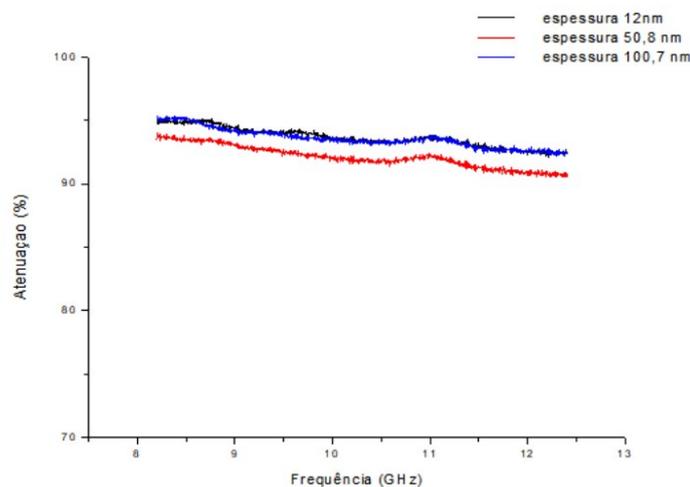
Na Tabela 2, são apresentados os valores da atenuação nos filmes finos de Al das espessuras 12 nm, 50,8 nm e 100,7 nm, obtidos em 2009 e analisados em 2022. Observa-se, analisando estes resultados que os filmes que, antes não alcançavam valores superiores a 20%, após o processo de envelhecimento natural atingiram valores da ordem de 95,5% de atenuação. A faixa de frequência de ressonância, onde há o cancelamento de fases também foi deslocada, para frequências de 10,5-11,5 GHz e pode ser visualizada na Figura 24.

Tabela 2: Eficiência média da capacidade absorvedora dos filmes finos de Al medidas em 2009 e 2022.

Material	Espessura(nm)	2009	2022
Al	12 nm	20%	95,5%
Al	50,8 nm	10%	93%
Al	100,7 nm	5%	95%

Fonte: A autora, 2022.

Figura 24: Atenuação da radiação eletromagnética dos filmes finos de Al obtidos pela técnica de evaporação resistiva em 2009, e analisados em 2022.



Fonte: A Autora, 2022.

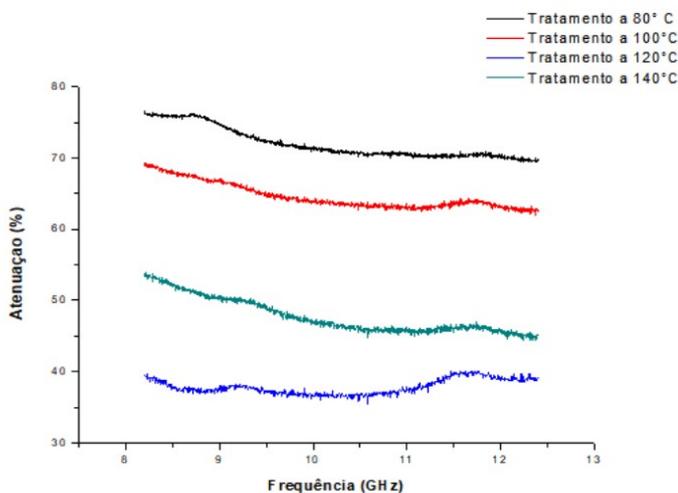
De acordo com estes dados e a análise comparativa entre as medições analisadas em 2009 e 2022, é possível verificar mudanças na capacidade atenuadora principalmente dos filmes de Al sem nenhum tipo de tratamento na amostra do filme. As amostras de Ti não mantiveram uma linearidade entre os valores, uma vez que, uma determinada espessura apresentou aumento no valor de atenuação, e outra espessura apresentou uma redução. Uma das hipóteses para a elevação da atenuação dos filmes de Al com o envelhecimento natural, é a oxidação dos filmes. Os óxidos em geral possuem maior resistividade (ATTIE, 2008) e, conseqüentemente, alteram a absorção da radiação promovida pelo material. Uma análise química da composição dos filmes com posterior comparação aos resultados obtidos inicialmente pode favorecer uma maior discussão neste sentido. O comportamento observado com o envelhecimento dos filmes de Al instiga pesquisas futuras sobre a influência da

oxidação em revestimentos com o objetivo de ampliar a absorção, sendo este um tema interessante para o desenvolvimento de trabalhos futuros.

#### 4.3.2 Atenuação do conjunto de amostras expostas ao 2º tratamento

Na Figura 24 são apresentados os valores da absorção dos filmes de Ti, em função da temperatura de tratamento. Como pode ser observado na Figura 25, a absorção do revestimento sem tratamento não é apresentada, pois, durante a análise, realizada em São José dos Campos, verifica-se que a mesma não se encontrava. Uma análise posterior será realizada. Cabe ressaltar, que comparando-se os valores de atenuação apresentados pelo filme de Ti tratados, eles possuem uma absorção muito superior àquela apresentada pelo revestimento em 2009, da ordem de 30%. Este resultado pode ser compreendido como um processo similar ao ocorrido pelo Al, de envelhecimento e formação de óxido superficial decorrente do tempo. Estudos posteriores para compreensão deste efeito serão realizados.

Figura 25: Atenuação eletromagnética dos filmes de Ti com 50,9 nm de espessura em função temperatura de tratamento.



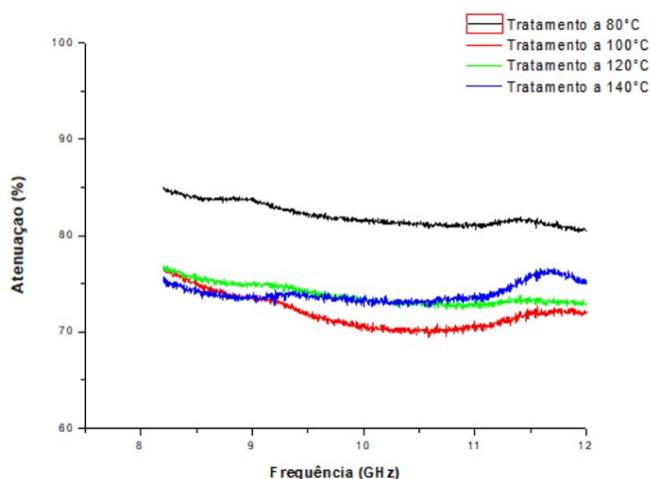
Fonte: A Autora 2022.

Avaliando-se apenas os resultados de absorção após o tratamento, nos filmes de 50,9nm de Ti, verifica-se uma redução da atenuação com a elevação da temperatura. Este decréscimo não apresentou uma linearidade, e pode ser explicada pelo mesmo fator que explica o aumento da atenuação nos filmes, a descontinuidade superficial. A presença de defeitos, conforme abordado na seção 4.2, se tornou visível àquela escala microscópica, isso mostra que o tratamento pode ter causado grandes irregularidades na estrutura do filme, fator

que pode ter interferido neste decréscimo. A análise então parte do pressuposto que a presença de defeitos na estrutura cristalina do filme proporciona aumento na atenuação até certo tamanho. A partir desta análise, para trabalhos futuros, uma possível abordagem seria até qual tamanho dos defeitos na superfície o material proporciona um aumento na atenuação. Ainda sim, estas amostras apresentam valores maiores para atenuação do filme de Ti, quando comparadas as sem tratamento térmico analisadas em 2009.

Na Figura 65 é possível visualizar o mesmo efeito do decréscimo da atenuação quando as amostras de Al estão expostas à temperaturas crescentes. Como analisado e apresentado na seção 4.2, os filmes de Al com 50,8nm de espessura, quando expostos ao aquecimento, não apresentaram a ocorrência significativa de defeitos em função da temperatura. A ausência destes defeitos comparados aos do filme de Ti, se deu pelo fato que, como abordado anteriormente, o Al é considerado um material mais dúctil que o Ti, apresentando menos fragilidade às tensões.

Figura 26: Atenuação eletromagnética dos filmes de Al com 50,8 nm de espessura em função da temperatura de tratamento.



Fonte: A Autora, 2022.

É possível perceber que, mesmo com decaimento da atenuação, as amostras dos filmes de Al ainda assim apresentaram alto índice de atenuação, se comparados com os resultados obtidos em 2009. Os valores para as atenuações nestes filmes, mesmos expostos aos ciclos de aquecimento, apresentam o menor valor de atenuação da ordem de 65% (tratados à 100°C) sendo o maior, quase 86% (tratados à 80°C).

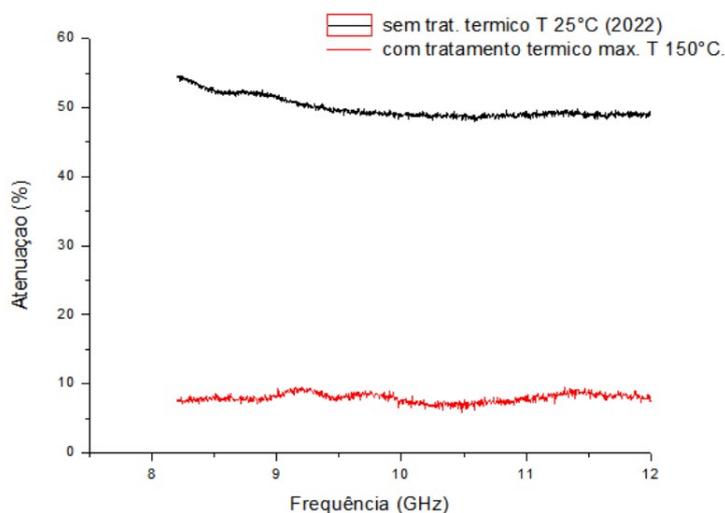
Uma outra consideração que pode ser feita analisando os resultados é a possibilidade de que, com a elevação da temperatura, o óxido formado pelo envelhecimento natural do

filme esteja sendo removido, e por isso, tende a apresentar os patamares de absorção inicialmente. Uma investigação mais aprofundada deste comportamento pode ser feito em trabalhos futuros, nos quais pode-se avaliar a composição química destes óxidos formados em função da temperatura.

### 4.3.3 Atenuação do conjunto de amostras expostas ao 1º tratamento

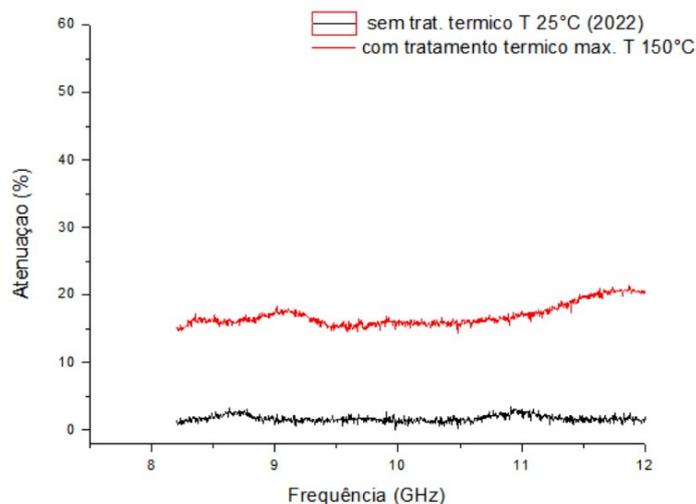
Conforme apresentado na Seção 3.2, o primeiro conjunto das amostras foram expostas a um aumento consecutivo de temperatura ao longo do tempo. Nesta seção abordaremos as análises da atenuação dos filmes quando estes, foram expostos a esse ciclo de aumento de temperatura até a temperatura máxima de 150°C. A Figura 27 apresenta a comparação da atenuação dos filmes de Ti com 31nm sem tratamento e com aquecimento até 150°C. No Anexo I é possível encontrar imagens dos filmes após o ciclo de aquecimento do filme. De acordo com os resultados apresentados na Figura 36, no Anexo I-A, pode-se observar que o filme de Ti com espessura de 31nm apresentou maior efeito da tensão compressiva no filme. Por outro lado, o filme de Ti com espessura de 93nm quase não apresentou esses efeitos de maneira visível, notando apenas um leve encurvamento. Na Figura 28 é apresentada, de forma análoga a anterior, uma comparação da atenuação do filme de Ti com 93nm de espessura sem tratamento e com aquecimento até 150°C.

Figura 27: Análise comparativa das atenuações dos filmes de Ti com 31nm de espessura antes e depois do aquecimento.



Fonte: A Autora, 2022.

Figura 28: Análise comparativa das atenuações dos filmes de Ti com 93nm de espessura antes e depois do aquecimento.



Fonte: A Autora, 2022.

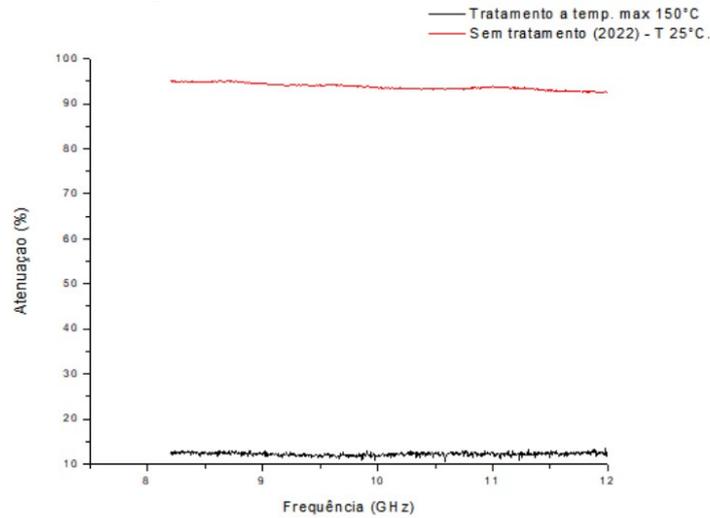
Conforme observado no comportamento da curvatura do material após os ciclos de aumento de temperatura, o filme com 31 nm de espessura apresentou queda de, aproximadamente, 40% dos valores de atenuação após o tratamento. Por outro lado o filme com 93 nm apresentou aumento nos valores de atenuação de, aproximadamente, 15% .

O fenômeno que pode explicar essa diferença entre as amostras de espessuras diferentes, foi anteriormente citado. Uma vez que a amostra com 93 nm não apresentou defeitos da ordem de grandeza que diminuíssem a atenuação, mas apresentou defeitos da ordem de grandeza suficiente, que conforme a literatura, aumentam a atenuação.

Para esta análise de resultados, também foram obtidos os dados das amostras de Al. No Anexo I-B o comportamento da amostra ao longo do aumento da temperatura é evidenciado por um efeito contrário ao apresentado pelos filmes de Ti. A amostra com 12nm, sendo de menor espessura, não apresentou mudanças visíveis na curvatura do filme. A Figura 29, apresenta a comparação da atenuação do filme de Al com 12nm sem tratamento e com aquecimento a 150°C. É possível observar uma redução da atenuação de, aproximadamente, 90% após o aquecimento. Neste caso, há a necessidade de maiores investigações, uma vez que o filme apresentou poucos defeitos na sua estrutura. Entretanto, pode-se supor, analisando-se os resultados, que o aquecimento promoveu a quebra dos óxidos superficiais, fazendo com que o revestimento obtivesse teores de absorção similares àqueles apresentados em 2009, como pode ser observado na Figura 22 do presente trabalho. De qualquer forma, cabe ressaltar a elevação da absorção apresentada por este revestimento, decorrente do

envelhecimento natural, que foi da ordem de 20% em 2009, para aproximadamente 95% em 2022.

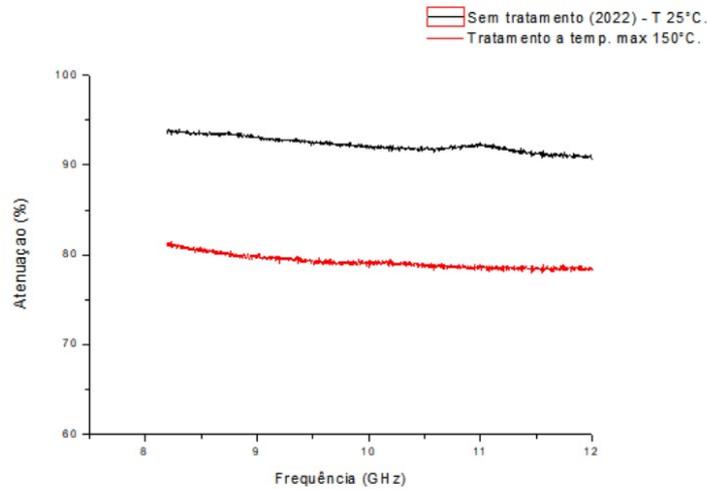
Figura 29: Análise comparativa das atenuações dos filmes de Al com 12nm de espessura antes e depois do tratamento térmico máximo.



Fonte: A Autora, 2022.

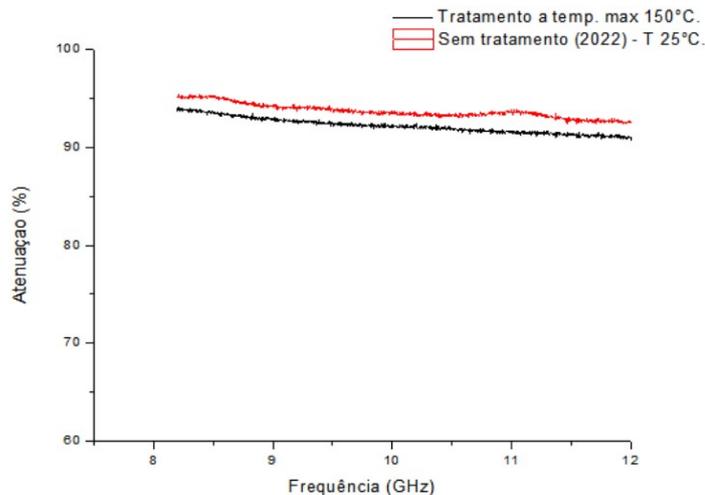
Diferentemente do comportamento absorvedor dos filmes de Al com espessura de 12nm após o aquecimento, o filme com 50,8 nm de espessura apresentou redução de, aproximadamente 15% e o filme com 100,7nm apresentou uma redução da atenuação de, aproximadamente 5% após o tratamento térmico. Isto leva a compreender que o efeito do aquecimento é reduzido para filmes com espessuras maiores. As Figuras 30 e 31 apresentam uma comparação da atenuação dos filmes finos de Al com 50,8 nm e 107 nm de espessura sem tratamento e com tratamento térmico, respectivamente. É possível analisar que, mesmo com estas reduções, os filmes de Al, para as espessuras analisadas, ainda mantiveram valores altos de atenuação.

Figura 30: Análise comparativa das atenuações dos filmes de Al com 50,8 nm de espessura antes e depois do aquecimento.



Fonte: A Autora, 2022.

Figura 31: Análise comparativa das atenuações dos filmes de Al com 100,7 nm de espessura antes e depois do aquecimento.



Fonte: A Autora, 2022.

Uma análise importante e já citada anteriormente, tanto nesta seção como em seções passadas, é a do comportamento elástico do material com a sua resistência a deformação pelo efeito das tensões térmicas nos filmes. Portanto, devido o comportamento dos filmes de Ti e Al aos ciclos de aumento de temperatura, é possível relacionar a eficiência da atenuação eletromagnética com as tensões térmicas geradas nos filmes, isto porque o aumento das imperfeições se relaciona com o aumento da atenuação ou redução da atenuação. Para

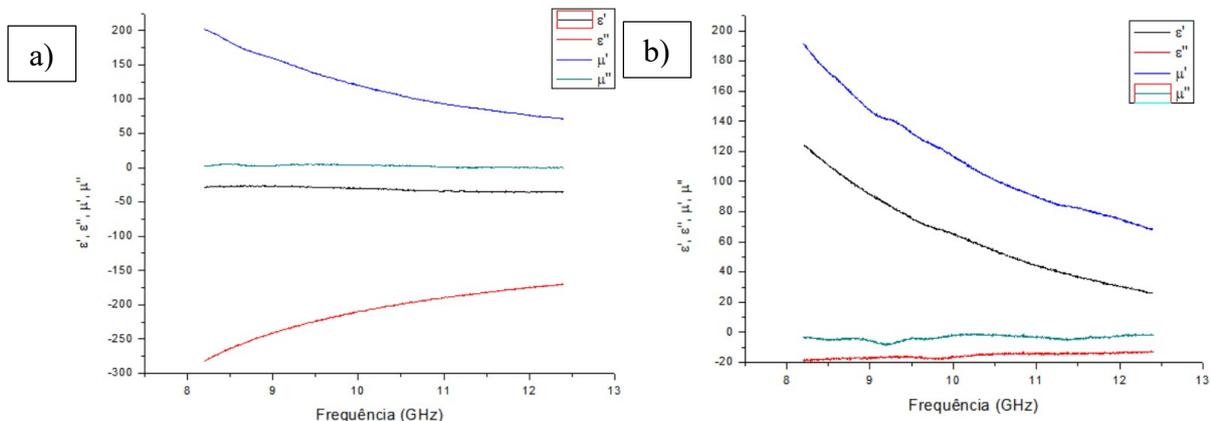
verificar os tamanho destes contornos de grãos aumentados pelo aquecimento, faz-se a necessidade de estudos posteriores.

#### 4.3.4 Estudo dos parâmetros intrínsecos: permeabilidade elétrica e permissividade magnética do conjunto de amostras expostas ao 1º tratamento

O efeito da atenuação das ondas eletromagnéticas dependem dos parâmetros de perda permissividade elétrica e permeabilidade magnética, que relacionam-se com a interação do material com o campo elétrico e magnético, respectivamente, da onda eletromagnética incidente.

Nesta seção os dados obtidos para o primeiro conjunto de amostras, expostos a temperatura máxima foram analisados, e comparados com os resultados das amostras sem nenhum tratamento. Na Figura 32 é possível analisar as curvas da permissividade elétrica e permeabilidade magnética reais e complexas dos filmes de Ti com 31 nm com e sem tratamento.

Figura 32: Curvas de permeabilidade magnética e permissividade elétrica real e imaginária do filme de Ti com 31 nm: a) sem tratamento térmico; b) com tratamento.



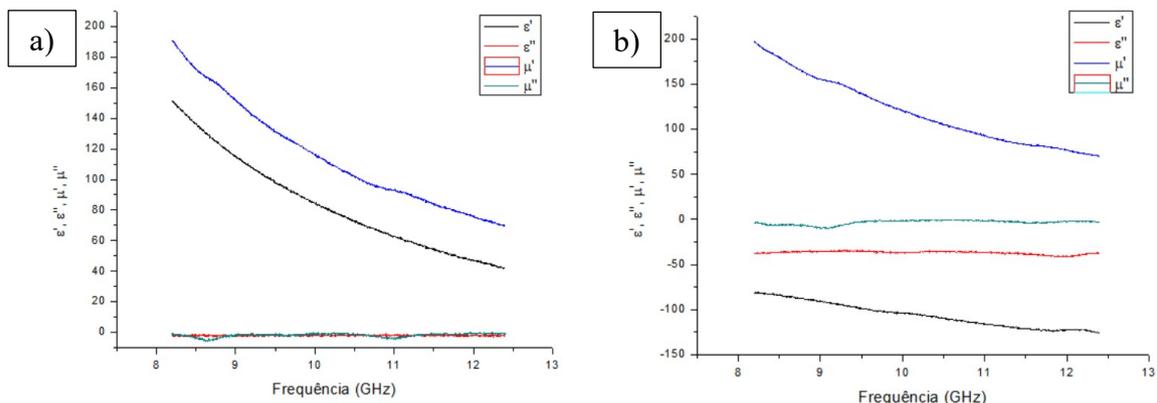
Fonte: A Autora, 2022.

Na seção anterior foi possível analisar o comportamento do Ti com 31 nm e notar que, os defeitos gerados na estrutura causaram deformações ao ponto que, estes não proporcionaram atenuação da onda eletromagnética, mas sim reduzi-lá. Os parâmetros da permissibilidade elétrica e permeabilidade magnética nos permite buscar compreender o comportamento destes absorvedores. É possível notar a alteração do comportamento das componentes de perda e armazenamento do material. Uma vez que os valores de  $\epsilon''$  e  $\mu''$  são

componentes de perda, estes por serem números complexos se apresentam com valores negativos, e quando inseridos na equações ( $\epsilon_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r''$ ) e ( $\mu_r = \mu_r' - j\mu_r''$ ) somam-se a sua sua componente total relativa de permissividade elétrica e permeabilidade magnética. Quando os valores imaginários se aproximam de valores positivos, estes indicam perda na propriedade dissipadora. Da mesma forma, quando os valores reais se aproximam de valores negativos, estes indicam ganho na propriedade de armazenamento.

Desta forma, pode-se dizer que o comportamento de absorção do filme fino de Ti com 31 nm sem tratamento térmico apresentou redução dos valores da componente da permissividade elétrica imaginária do filme de, aproximadamente 280 (duzentos e oitenta) para, aproximadamente 170 (seto e setenta) ao longo do aumento da frequência. Partindo do valor inicial da componente imaginária no filme sem tratamento térmico, e analisando pós tratamento térmico, é possível constatar a redução a variação de valores de, aproximadamente 280 (duzentos e oitenta) para 19 (dezenove). Os valores da permeabilidade magnética sem e com tratamento se aproximam de 1 (um), e quase não sofre alterações de valores, o que indica que não há mecanismo de perda magnético envolvido nos processos de absorção destes revestimentos. Em contra partida as componentes reais da permissividade elétrica e permeabilidade magnética apresentam valores que se aproximam de valores negativos para o filme com tratamento. Esse fator indica que o material está armazenando mais energia do que dissipando após o tratamento. O filme de Ti com 93nm apresentou um pequeno aumento da atenuação com o tratamento, sendo que na Figura 33 é possível analisar as componentes de dissipação e armazenamento da energia deste revestimento antes e depois do tratamento em temperatura máxima (150°C).

Figura 33: Curvas de permeabilidade magnética e permissividade elétrica real e imaginária do filme de Ti com 93 nm: a) sem tratamento térmico; b) com tratamento.



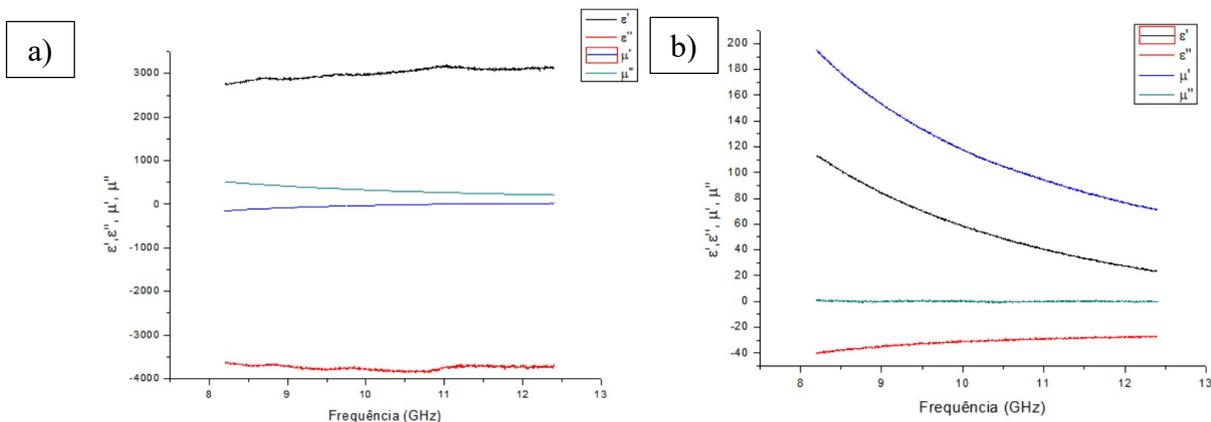
Fonte: A Autora, 2022.

Nota-se que a componente de permissividade imaginária  $\epsilon''$  no filme fino de Ti com 93nm sem tratamento térmico, apresenta valores baixos de, aproximadamente 2 (dois) e sofre um aumento do valor de, alcançando valores médios de, aproximadamente 38 (trinta e oito). Evidenciando o efeito de que, essa amostra apresentou cerca de, aproximadamente, 15% após o tratamento térmico máximo. Novamente, o valor da permeabilidade imaginária quase não apresentou alterações nesta faixa de frequência. As componentes reais de permissividade apresentaram, como de se esperar, redução de suas propriedades de armazenamento. É possível visualizar ainda um decréscimo de valores com o aumento da frequência, antes e depois do tratamento térmico.

Como visto anteriormente, tanto o filme de Ti com 31 nm quanto o filme de Ti com 93 nm, sofreram deformações de espessura apresentou maiores deformações em sua estrutura cristalina, bem como o filme de 93nm. A diferença entre eles é o tamanho dessas deformações. Como a componente de dissipação se relaciona com a distribuição das partículas elétricas e magnéticas em uma matriz (SAVILLE; HUBBER; MAKEIFF, 2005), é possível notar a influência do tratamento térmico na modificação da matriz destes.

Para os filmes finos de Al, sem tratamento, é possível, notar valores altíssimos de permissividade elétrica. Estes valores estão diretamente ligados a propriedade condutora do material. A Figura 34 apresenta os gráficos comparativos dos valores das permissividade elétrica e permeabilidade magnética do filme fino de Al com 12 nm de espessura.

Figura 34: Curvas de permeabilidade magnética e permissividade elétrica real e imaginária do filme de Al com 12nm: a) sem tratamento; b) com tratamento .



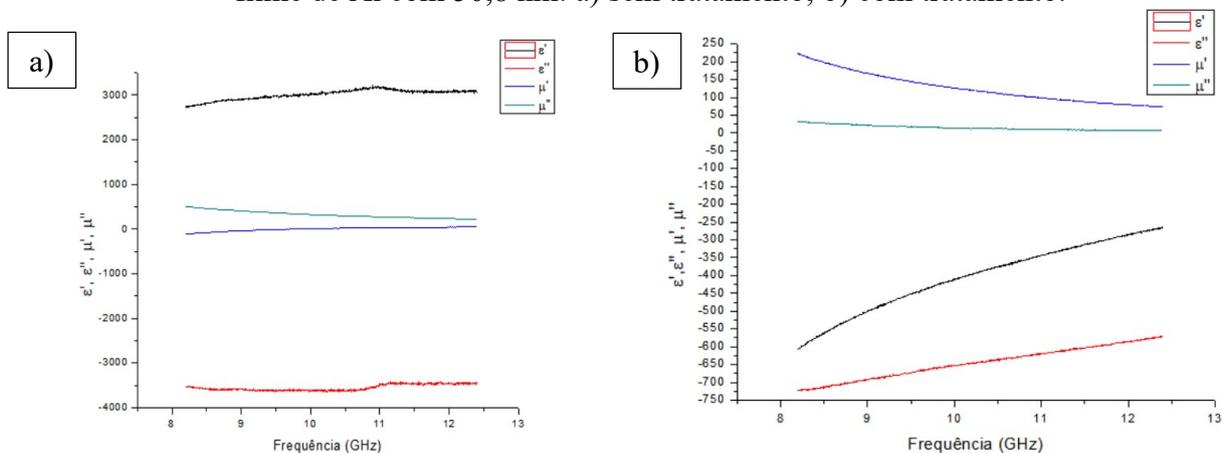
Fonte: A Autora, 2022.

É possível notar no comportamento da curva de permissividade imaginária  $\epsilon''$  do filme sem tratamento, valores elevados na faixa de, aproximadamente, 4000 (quatro mil).

Quando a amostra é exposta ao tratamento de aquecimento na máxima temperatura este valor reduz para, aproximadamente 35 (trinta e cinco). A curva da permeabilidade imaginária  $\mu''$  mantém seus valores sempre se aproximando do valor 1 (um). A curva da permissividade elétrica real no filme com tratamento térmico, apresenta valores que decaem de aproximadamente, 3000 (três mil) para um valor médio de, aproximadamente 50 (cinquenta), fator que mostra que a curva se aproxima de valores negativos, portanto indicando aumento da capacidade de armazenamento. É interessante analisar que, antes do tratamento, o material possuía características magnéticas baixas, e começaram a apresentar algum valor após o tratamento do filme. O tratamento do filme fino de Al com 12 nm de espessura promoveu uma alteração abrupta nos parâmetros de permissividade elétrica e permeabilidade magnética. Este comportamento pode explicar as características absorvedoras dos filmes finos, entretanto, não é o escopo do presente trabalho, sendo sugerida sua continuidade em trabalhos futuros.

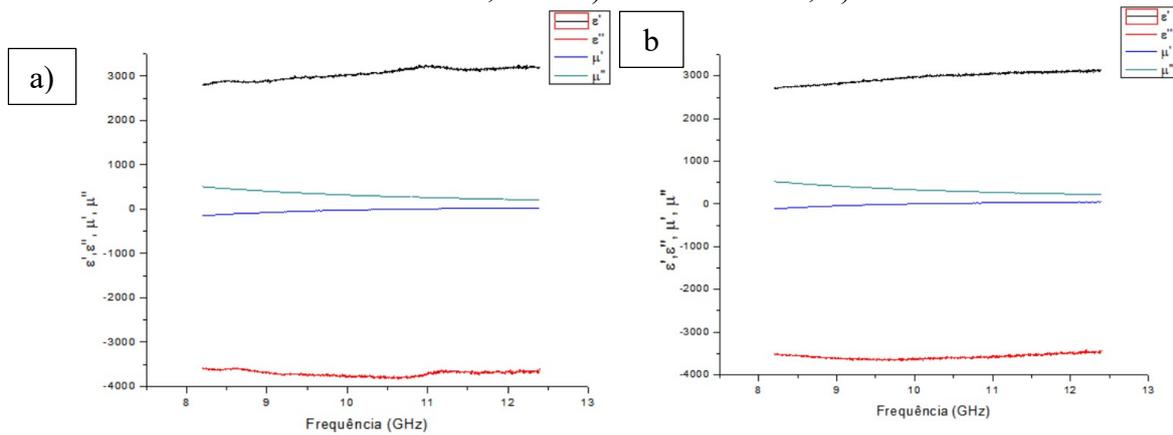
Nas Figuras 35 e 36 são apresentados, respectivamente, o comportamento das componentes das permissividade elétrica e permeabilidade magnética reais e complexas, do filme de Al com 50,8 nm e 100,7 nm de espessura sem e com tratamento, respectivamente.

Figura 35: Curvas de permeabilidade magnética e permissividade elétrica real e imaginária do filme de Al com 50,8 nm: a) sem tratamento; b) com tratamento.



Fonte: A Autora, 2022.

Figura 36: Curvas de permeabilidade magnética e permissividade elétrica real e imaginária do filme de Al com 100,7 nm: a) sem tratamento; b) com tratamento.



Fonte: A Autora, 2022.

Analisando-se os resultados, observa-se que os filmes de Al com as espessuras de 50,8 nm e 100,7 nm apresentaram redução da atenuação menos abrupta que a ocorrida no filme de Al com 12nm.

Analisando-se estes resultados, é possível observar a diferença das curvas da permissividade elétrica imaginária  $\epsilon''$  dos filmes sem tratamento ilustrados nas Figuras 34a e 35a. A diferença destes valores médios é baixa, indicando que ficam próximos de, aproximadamente 3590 ( três mil quinhentos e noventa). A pouca variação deste parâmetro, de uma espessura para outra, pode ser analisada nas Figuras 30 e 31, quando estas mostram valores aproximados em (%) de atenuação. Os valores de atenuação destes filmes sem tratamento são altíssimos, como mencionado anteriormente, aproximadamente 92%-95%, sendo possível correlacionar este fenômeno aos valores apresentados pelas componentes da permissividade elétrica imaginária.

Analisando o filme com 50,8 nm de espessura com e sem tratamento é possível identificar a alteração dos valores de, praticamente, todos os parâmetros. O valor da permissividade imaginária reduz de, aproximadamente 3500 (três mil e quinhentos) para um valor médio de, aproximadamente, 670 (seiscentos e setenta). Este fenômeno indica que o filme reduziu sua propriedade de perda. Equanto isso, a componente real de permissividade magnética aumenta ultrapassando a faixa dos valores negativos, indo de, aproximadamente 2750 (dois mil setecentos e cinquenta) para 665 (seiscentos e sessenta e cinco), fator que indica aumento da propriedade de armazenamento. Nesta análise é possível notar também a mudança da componente da permeabilidade magnética real após o tratamento, indicando que o material está interagindo com a componente magnética da radiação eletromagnética incidente.

Por outro lado, o filme de Al com 100,7 nm, apesar de apresentar valores de redução de atenuação após o tratamento, não indicam muitas variações dos parâmetros. Os parâmetros neste caso apresentam comportamento semelhante.

## 5. CONCLUSÃO

Nas análises microscópicas realizadas, foi possível notar defeitos em grande parte dos filmes analisados. Estes ocorreram pelo efeito das tensões térmicas que geraram tensões do tipo compressivas no filme. Os filmes de Al e Ti tiveram comportamentos diferentes diante destas tensões.

As tensões geradas nos filmes, provocaram o que chamou-se de estrias. Um ponto interessante a ser abordado é que, visivelmente o filme de Ti apresentou mais defeitos em sua superfície se comparado ao Al, que pode ser atribuído à diferença de propriedades mecânicas de ambos os materiais estudados.

Os filmes finos utilizados no trabalho tiveram sua absorção medida em 2009, quando foram obtidos, e nesta pesquisa, em 2022. Os novos resultados obtidos mostraram um aumento na atenuação em até 95,5% para os filmes finos de Al. Esta mudança de propriedade pode ser explicada por um processo de envelhecimento natural no qual se acredita ter havido a formação de óxidos na superfície dos filmes.

No 2º Tratamento as amostras de Ti com 50,9 nm apresentaram um decréscimo de, aproximadamente, 10% de absorção se comparado com a amostra exposta a temperatura de 80°C e a amostra exposta a temperatura de 100°C. As atenuações das amostras expostas a temperatura de 120°C mostram valores de, aproximadamente, 40% para a última temperatura. Os filmes de Al com 50,8 nm não apresentaram defeitos em grande escala. Quando este filme foi exposto à temperatura de 80°C praticamente não apresentou nenhuma alteração na deformação física do material, e cerca da redução de, aproximadamente, 15% de absorção quando foi exposto à temperatura de 100°C. O Al, apresenta uma resistência a deformação maior do que a do Ti, e portanto, não gerou defeitos suficientes, que proporcionasse uma variação maior de atenuações para as temperaturas de 100°C, 120°C e 140°C.

No 1º Tratamento, a amostra do filme fino de Ti com 31 nm apresentou uma redução de, aproximadamente, 40% da atenuação. Entretanto, o filme de Ti com espessura de 93 nm, apresentou um aumento na atenuação, se comparado com o filme sem nenhum tratamento. Como apresentado no anexo I, os filmes de Ti com 93nm não mostraram grandes deformações com o aumento da temperatura. Porém, seguindo a análise dos defeitos visíveis, é possível notar que, sem deformações os filmes pouco modificam sua superfície. Ou seja, modificaram o suficiente para apresentar aumento da atenuação de, aproximadamente 15%.

Os filmes finos de Al, apresentaram comportamento de redução da atenuação com o tratamento. É possível notar que, com o aumento da espessura, menor a redução da atenuação dos filmes quando exposto a aumento da temperatura. De maneira geral, como conhecido e citado, o Al possui maior resistência a deformação, o que vincula todos estes resultados.

Pode-se concluir então que, para determinadas espessuras, e exposição a temperatura e tempo de exposição, os filmes de Ti e Al ainda possuem características absorvedoras de radiação eletromagnética. Entretanto, para evidenciar estes resultados de forma mais detalhada e pontual, faz-se necessário um aprofundamento nas pesquisas de forma a tentar correlacionar todas as propriedades estudadas até o momento. O comportamento dos parâmetros de perda permissibilidade elétrica e permeabilidade magnética necessitam de maior investigação para avaliar sua correlação com as características absorvedoras dos filmes, entretanto, dos resultados pode-se inferir que os filmes finos de Al e Ti apresentam maior processos de perda do tipo dielétrico, sendo esta uma importante constatação do presente trabalho.

## **SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

- Efeito do tamanho dos defeitos nas estruturas cristalinas do filme fino e a influência nas propriedades de absorção da radiação eletromagnética;
- Avaliar a influência dos processos de oxidação nas características absorvedoras de filmes finos;
- Verificar os tamanho dos contornos de grãos aumentados no filme pelo aquecimento;
- Composição química dos óxidos formados nos filmes em função da temperatura;
- A influência da oxidação em revestimentos com o objetivo de ampliar a absorção;
- A influência da degradação do substrato ao longo dos anos e a influência dele no processo de atenuação;

## 6. REFERÊNCIA BIBLIOGRAFICA

ATTIE, Márcia Regina Pereira. **Estudos dos mecanismos responsáveis pela passivação de metais: Cobre**. 2008. 137 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

BAGUDAI, P. P. **Quantum Stealth**. 2013. 23f. Trabalho de conclusão de curso (Bachelor of Technology in Electronics and Communication Engineering. Siksha 'o' Anusandhan University), Bhubaneswar, Odisha, India. 2013.

BOSMAN, L.; LAU, Yue Ying; Gilgenbach, Ronald M. Power Absorption by Thin  
BUBERT, H.; JENETT, H. **Surface and Thin film Analysis**. 2002. Institute of Spectrochemistry and Applied Spectroscopy (ISAS), Wiley-VCH, Germany, 336p.

CHENG, D.K. Field and Wave Electromagnetics. 2 ed. Boston: Adison-Wesley, 1992.

COUTINHO, N. F. **Propriedades Estruturais, Ópticas e Mecânicas de Filmes Finos de Triiodeto de Bismuto (BiI<sub>3</sub>) Depositados por Evaporação Térmica**. 2019. 137 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2019.

DIAS, J. C. SILVA, F.S. REZENDE, M.C. Absorvedores de radiação eletromagnética aplicados no setor aeronáutico. **Revista Ciência & Tecnologia**, v. 15, p. 33-42. 2000.

Films on Microwave Windows. **IEE Transactions o Plasma Science**. V. 32, n. 3, p.1292-1297

FONTANA, L.C.; MUZART, J.L.R. Characteristics of triode magnetron sputtering: the morphology of deposited titanium films. 1998. **Surface and Coatings Technology**, Vol. 107, No. 1, pp. 24-30.

FREIRE, M. V. **Desenvolvimento de material polimérico de matriz alquídica com características absorvedoras de radiação eletromagnética**. 2017. Trabalho de conclusão de

curso (Graduação em Engenharia Aeroespacial), Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, SC. 2007.

FREIRE, V. M. SOETHE, V. L. DELATORRE, R. G. PARUCKER, M. L. **Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética, Baseados em um Compósito Híbrido de Fibra de Vidro**. X FOCIEST. 2016. Disponível em: <[http://lats.paginas.ufsc.br/files/2016/09/VMFreire\\_FOCIEST.pdf](http://lats.paginas.ufsc.br/files/2016/09/VMFreire_FOCIEST.pdf)>. Acesso em: 15 Julho. 2021.

FUCHS K. **The conductivity of thin metallic films according to the electron theory of metals**, Proc Camb Philos Soc 1938, 34:100-108. 7.

HSUEH, H.C; CHEN, R.K; VASS, H; CLARCK, S.J; ACKLAND, G.J. Compression mechanisms in quasimolecular  $x \times 3$  ( $x = a, s, b, b, i$ ) solids. **Physical Review B**, 58(22):14812, 1998.

JENA S; SAHOO N.K. **Evolutionary Design, Deposition and Characterization Techniques for Interference Optical Thin-Film Multilayer Coatings and Devices**. In: Kumar S., Aswal D. (eds) **Recent Advances in Thin Films**. Materials Horizons: From Nature to Nanomaterials. Springer, Singapore., 2020. < [https://doi.org/10.1007/978-981-15-6116-0\\_10](https://doi.org/10.1007/978-981-15-6116-0_10) > jun. 2004.

KNOTT, E.F; SHAEFFER, J.F TULEY, M.T. **Radar cross section, its prediction, measurement and reduction**. Artech House, Inc, 1985.

LAGATTA, C. F **Medições de tensões residuais em filmes finos durante o processo de deposição**. 2011. 82 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

LAX, B., BUTTON, K.J. Microwave Ferrite and Ferrimagnetics. New York, **McGraw-Hill Book Company**, pp. 47, 92-95, 114-124, 1962.

LEE, S.M. (Ed.). **International Encyclopaedia Of Composites**. 6. ed. New York: VHC Publishers, 1991. 600 p.

MACHLIN, E.S. **Materials Science in Microelectronics**, Elsevier, Volume 2, 1998. Norma técnica internacional: ASTM E2456-06- Terminology for Nanotechnology.

MARINHO, C. S. **Caracterização de Materiais Absorvedores de Ondas Eletromagnéticas (MARE)**. 2010. Disponível em: <<http://www.teleco.com.br/pdfs/tutorialcaracmat.pdf>>. Acesso em: 26 Julho. 2021.

MAYES, E. U.S. **Patent** N°6986942, 2006.

MILITARY CRITICAL TECHNOLOGY LIST, Section 18: **Signature Control Technology**, **Departament** of Defense to USA, 2004.

NOHARA, E. L. **Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética (8-12 GHz) Obtidos pela Combinação de Compósitos Avançados Dielétricos e Revestimentos Magnéticos**. 2003, Tese Ph.D. Instituto Tecnológico de Aeronáutica, ITA, São José dos Campos, SP. 2003.

NUSSENVEIG, H.M. **Curso de Física Básica 3: Eletromagnetismo**. São Paulo: Edgar Blucher, 1997. 323 p.

OHRING, M. **The Materials Science of Thin Films**. San Diego: Academic Press, 1992. 742 p.

PEREIRA, J.J. **Caracterização eletromagnética de materiais absorvedores de microondas via medidas de permissividade e permeabilidade complexas na banda X**. 201 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Taubaté, Taubaté, 2007.

QUADROS, Hugo Borges de. **AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS RESISTIVAS DE FILMES FINOS ABSORVEDORES DE RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA**. 2014. 84 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Aeroespacial, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2014.

REJAS, P. E. B. **Filmes finos metálicos absorvedores de radiação eletromagnética aplicados a tecnologia furtiva**. 2014. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Aeroespacial), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

REZENDE, M. C.; MARTIN, I.; SILVA, F. S. Materiais absorvedores de radiação eletromagnética, **Spectrum**, v.2, p. 17-20, 2000.

SAVILLE, P. Review of Radar Absorbing Materials. **Defence Research & Development Atlantic Dartmouth**, Canada. 2005.

SHEN, Y.L.. **Constrained Deformation of Materials**: devices, heterogeneous structures and thermo-mechanical modeling. New Mexico: Springer, 2010. 290 p.

SIMÕES, R. **Materiais absorvedores de radiação eletromagnética na faixa de 8 a 12 GHz**. 2005. 87 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Tecnologia de Materiais e Processos de Fabricação, Universidade de Taubaté, UNITAU, Taubaté, SP. 2005.

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

SOETHE, V.L; NOHARA, E.L; REZENDE, M.C. FONTANA, L.C. Influência da espessura de filmes finos de alumínio na atenuação da energia da onda eletromagnética na faixa de microondas(8 – 12GHz). **Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo**, v. 27, 2008.7

SOETHE. V. L.; NOHARA. E. L.; FONTANA. L. C.; REZENDE. M. C. Radar absorbing materials based on titanium thin film obtained by sputtering technique. **J. Aerosp. Technol. Manag**, vol. 3, no. 3, pp. 279–286, 2011.

SONDHEIMER, EH: **The mean free path of electrons in metals**. Adv Phys 1952. Mayadas AF, Shatzkes M: Electrical-resistivity model for polycrystalline films: the case of arbitrary reflection at external surfaces. Phys Rev B 1970, 1:1382-1389

TATSCH, P.J. Deposição de filmes finos. V Oficina de Microeletrônica.

UFINTSEV, P. Ya.. **Method of edge waves in the physical theory of diffraction.**  
Springfield: Foreign Technology Division, 1962.

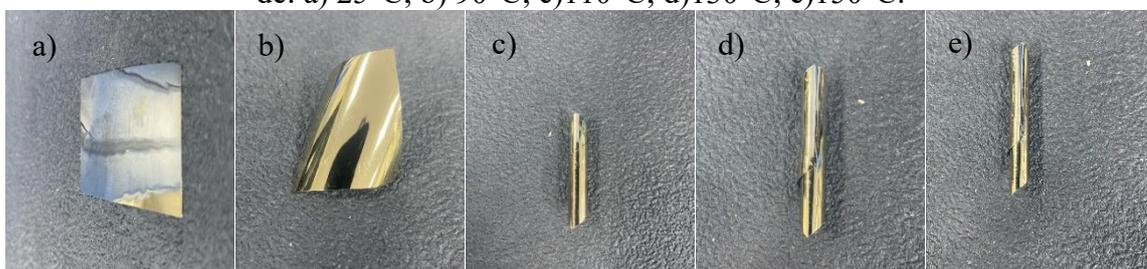
ZIKIDIS, K; SKONDRAS, A; TOKAS, C. Low Observable Principles: Stealth Aircraft and Anti-Stealth Technologies. **Journal Of Computations & Modelling, London**, v. 4, n. 1, p.129-165, 2014.

## ANEXO I

Análise visual do comportamento dos filmes submetidos ao tratamento de aquecimento consecutivo até a temperatura máxima de 150°C.

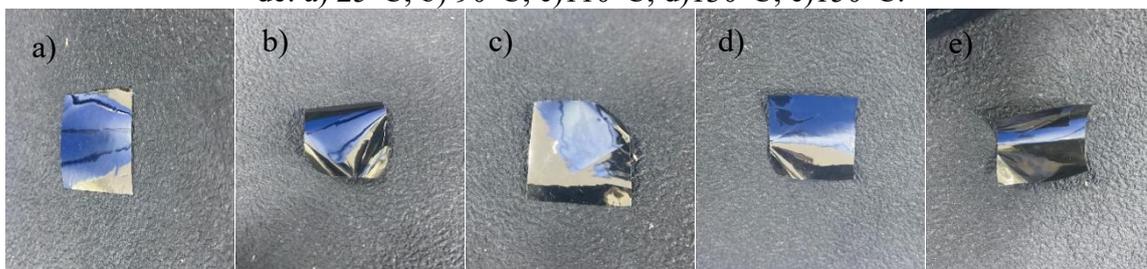
### A) Amostras de Ti

Figura 37: Comportamento da amostra do filme de Ti com 31 nm ao longo das temperaturas de: a) 25°C; b) 90°C; c) 110°C; d) 130°C; e) 150°C.



Fonte: A autora, 2022.

Figura 38: Comportamento da amostra do filme de Ti com 93 nm ao longo das temperaturas de: a) 25°C; b) 90°C; c) 110°C; d) 130°C; e) 150°C.

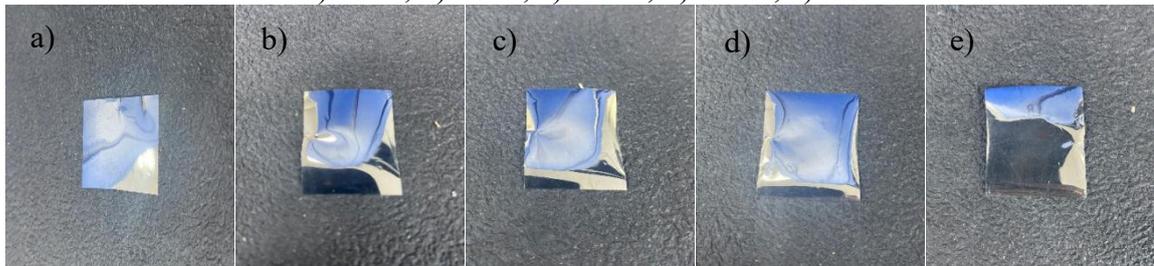


Fonte: A autora, 2022.

No caso do Ti, é possível observar que, com maior espessura do filme, após uma temperatura, o filme demonstrou pouca suscetibilidade a deformação.

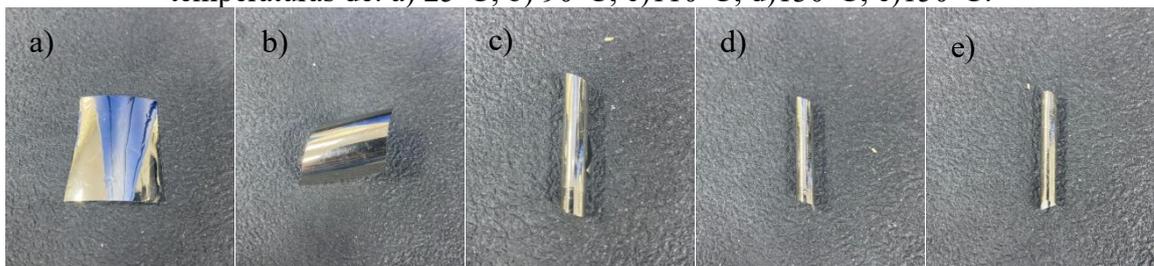
## B) Amostras de Al

Figura 39: Comportamento da amostra do filme de Al com 12 nm ao longo das temperaturas de: a) 25°C; b) 90°C; c) 110°C; d) 130°C; e) 150°C.



Fonte: A autora, 2022.

Figura 40: Comportamento da amostra do filme de Al com 100,7 nm ao longo das temperaturas de: a) 25°C; b) 90°C; c) 110°C; d) 130°C; e) 150°C.



Fonte: A autora, 2022.

Nas amostras de Al, é possível notar que, inversamente as amostras de Ti, a amostra com menor espessura apresentou pouca disponibilidade para a deformação.