

**MINISTÉRIO DA DEFESA  
EXÉRCITO BRASILEIRO  
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA  
CURSO DE MESTRADO EM CIÊNCIA DOS MATERIAIS**

**WESLEY OLIVEIRA DA SILVA**

**FILMES ULTRAFINOS DE TITÂNIO TRANSPARENTES PARA A LUZ  
VISÍVEL E ABSORVEDORES DE MICRO-ONDAS**

**Rio de Janeiro  
2016**

**INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA**

**WESLEY OLIVEIRA DA SILVA**

**FILMES ULTRAFINOS DE TITÂNIO TRANSPARENTES PARA A LUZ  
VISÍVEL E ABSORVEDORES DE MICRO-ONDAS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Mestrado em Ciência dos Materiais do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências dos Materiais.

Orientador: Prof. Carlos Luiz Ferreira - D.C

Rio de Janeiro  
2016

c2017

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

Praça General Tibúrcio, 80 – Praia Vermelha

Rio de Janeiro – RJ CEP: 22.290-270

Este exemplar é de propriedade do Instituto Militar de Engenharia, que poderá incluí-lo em base de dados, armazenar em computador, microfilmear ou adotar qualquer forma de arquivamento.

É permitida a menção, reprodução parcial ou integral e a transmissão entre bibliotecas deste trabalho, sem modificação de seu texto, em qualquer meio que esteja ou venha a ser fixado, para pesquisa acadêmica, comentários e citações, desde que sem finalidade comercial e que seja feita a referência bibliográfica completa.

Os conceitos expressos neste trabalho são de responsabilidade do(s) autor(es) e do(s) orientador(es).

620.1	Silva, Wesley Oliveira da
S586f	Filmes ultrafinos de titânio transparentes para a luz visível e absorvedores de micro-ondas / Wesley Oliveira da Silva; orientado por Carlos Luiz Ferreira – Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2016.
	70p.: il.
	Dissertação (Mestrado) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2017.
	1. Curso de Ciência dos Materiais – teses e dissertações. 2. Filmes finos. 3. Radiação eletromagnética. I. Ferreira, Carlos Luiz. II. Título. III. Instituto Militar de Engenharia.

**INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA**

**WESLEY OLIVEIRA DA SILVA**

**FILMES ULTRAFINOS DE TITÂNIO TRANSPARENTES PARA A LUZ  
VISÍVEL E ABSORVEDORES DE MICRO-ONDAS**

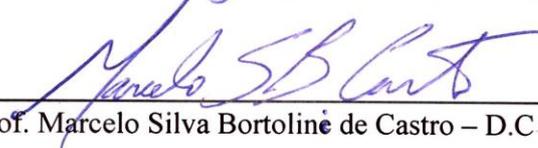
Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Mestrado em Ciência dos Materiais do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências dos Materiais.

Orientador: Prof. Carlos Luiz Ferreira - D.C.

Aprovada em 29 de Agosto de 2016 pela seguinte Banca Examinadora:



Prof. Carlos Luiz Ferreira – D.C. do IME - Presidente



Prof. Marcelo Silva Bortolin de Castro – D.C do CUMSB



Prof. Ronaldo Sergio de Biasi – Ph.D. do IME



Prof. Wagner Anacleto Pinheiro – DC do IME

Rio de Janeiro

2016

Dedico este trabalho a pessoa mais importante de  
minha vida, Giselle Vasconcellos. Minha esposa  
amada, meu amor eterno.

## AGRADECIMENTOS

A minha amada esposa Giselle Vasconcellos pela dedicação, pelo incentivo nos melhores e piores momentos de minha vida, e por ser meu ponto de equilíbrio.

Aos meus pais Osias Jorge (em memória) e Angelina, pelo exemplo de vida, dedicação e incentivo.

Aos meus irmãos Alessandra e Wellington, e aos meus sobrinhos Maria Eduarda, Luiz Felipe e Valentina que tornam a minha experiência de vida muito mais prazerosa e aventureira.

Ao professor Carlos Luiz Ferreira, por toda sua dedicação, amparo, ensinamentos e aperfeiçoamentos deste estudo. Sou grato por toda paciência e comprometimento durante a elaboração deste trabalho

Ao professor Irani Mattoso pela amizade, empenho e auxílio durante a construção desta dissertação e na colaboração dos procedimentos experimentais.

À professora Leila por seus ensinamentos, dedicação à engenharia e aos seus alunos.

Aos colegas de laboratório Cap. Alberto Pessoa, Rodrigo Amaral, Austin Pimenta, Renan que somaram sabedoria a esta jornada.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudo concedida.

Ao Laboratório de Filmes Finos (LFF) pelo apoio a este estudo, pelos materiais e informações concedidos.

Ao Laboratório de Microscopia Eletrônica por todo apoio

Ao Laboratório de Medidas Eletromagnéticas do CTEEx, por toda colaboração com as caracterizações de micro-ondas, nas pessoas do pesquisador Raphael e Técnico Paulo.

Ao Instituto Militar de Engenharia (IME) pela qualidade no ensino.

“Mas você deve ser forte e não desanimar, pois o seu trabalho será recompensado”

(II Crônicas – 15:7)

## SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	10
LISTA DE TABELAS.....	14
LISTA DE SÍMBOLOS.....	15
LISTA DE SIGLAS.....	16
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO ..... 19</b>
1.1	Motivação.....23
1.2	Objetivo.....24
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTOS TEÓRICOS ..... 25</b>
2.1	Absorvedores de Micro-ondas.....25
2.2	Propriedades Elétricas.....27
2.3	Profundidade Pelicular.....27
2.4	Transmitância Óptica.....29
<b>3.</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... 30</b>
<b>4.</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS..... 36</b>
4.1	Evaporação por Feixe de Elétrons.....36
4.2	Material Evaporante.....37
4.3	Substrato.....38
4.4	Perfilometria.....39
4.5	Resistividade.....39
4.6	Refletância e Transmitância e Micro-ondas na faixa de 8 a 12GHz.....40
4.7	Transmitância Óptica.....41
4.8	Microscopia Eletrônica.....41
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES ..... 42</b>
5.1	Determinação das Espessuras.....43
5.2	Resistência de Folha.....44
5.3	Absorção de Micro-ondas.....50

5.4	Microscopia Eletrônica.....	57
5.5	Transmitância Óptica.....	59
6	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>64</b>
7	<b>SEGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>65</b>
8	<b>REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>66</b>

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- FIG. 1.1 Jato GO 229 [ASAS DE FERRO, 2015].....18
- FIG. 1.2 Lockheed SR-71 [SR-71, 2016].....19
- FIG. 1.3 M-80 Stiletto [NAVAL TECHNOLOGY, 2016].....20
- FIG. 2.1 Interações do material com radiação eletromagnética.....25
- FIG. 3.1 Resistividade do filme de Cu em função da espessura (adaptado: LIU, 2001).....29
- FIG. 3.2 Relação entre espessura e resistividade em filmes de Cu (Adaptado: MECH 2011).30
- FIG. 3.3 Relação entre o percentual de atenuação da radiação eletromagnética e espessura...31
- FIG. 3.4 Transmitância óptica dos filmes finos de Au. (Adaptado: AXELEVITCH 2012)....32
- FIG. 3.5 Variação da resistividade elétrica em função da espessura de filmes finos de Al (Adapatado: PANTA 2012).....32
- FIG. 3.6 Efeito do tratamento térmico a uma temperatura de 498°C na resistividade dos filmes finos de cobre (Adaptada: LOUDJANI, 2015).....33
- FIG. 3.7 Efeito do tratamento térmico a uma temperatura de 498°C na resistividade dos filmes

finos de níquel (Adaptada: LOUDJANI, 2015).....	34
FIG. 4.1 Evaporadora da Edwards, modelo 19A.....	35
FIG. 4.2 Máscara utilizada nas deposições.....	37
FIG. 4.3 Medidor de resistividade BIO- RAD.....	38
FIG. 4.4 Geometria para medidas elétricas.....	38
FIG. 4.5 Ilustração do método de medida por um analisador de rede [Figura retirada: SILVA 2014].....	39
FIG. 4.6 Foto do Espectrofotômetro Cary 5000.....	41
FIG. 5.1 Curva de calibração para estimativa da espessura.....	42
FIG. 5.2 Resistência de folha (Ohm/quadrado) dos filmes depositados em diferentes graus de pureza em função da espessura ( $\text{Å}$ ) para a taxa de $1\text{Å/s}$ .....	44
FIG. 5.3 Resistência de folha (Ohm/quadrado) dos filmes depositados em diferentes graus de pureza em função da espessura ( $\text{Å}$ ) para a taxa de $3\text{Å/s}$ .....	44
FIG. 5.4 Resistência de folha (Ohm/quadrado) dos filmes depositados em diferentes graus de	

pureza em função da espessura ( $\text{\AA}$ ) para a taxa de  $5\text{\AA}/\text{s}$ .....45

FIG. 5.5 Resistência de folha ( $\text{Ohm}/\text{sq}$ ) dos filmes de TiGr2 depositados em diferentes taxas de deposição em função da espessura ( $\text{\AA}$ ).....46

FIG. 5.6 Resistência de folha ( $\text{Ohm}/\text{sq}$ ) dos filmes de TiGr4 depositados em diferentes taxas de deposição em função da espessura ( $\text{\AA}$ ).....47

FIG. 5.7 Resistência de folha ( $\text{Ohm}/\text{sq}$ ) dos filmes de TiGr5 depositados em diferentes taxas de deposição em função da espessura ( $\text{\AA}$ ).....47

FIG. 5.8 Percentual de absorção de micro-ondas em 10 GHz em função da espessura, para os graus de pureza TiGr2, TiGr4 e TiGr5, depositados a uma taxa de  $1\text{\AA}/\text{s}$ .....49

FIG. 5.9 Percentual de absorção de micro-ondas em 10GHz em função da espessura, para os graus de pureza TiGr2, TiGr4 e TiGr5, depositados a uma taxa de  $3\text{\AA}/\text{s}$ .....50

FIG. 5.10 Percentual de absorção de micro-ondas em 10 GHz em função da espessura, para os graus de pureza TiGr2, TiGr4 e TiGr5, depositados a uma taxa de  $5\text{\AA}/\text{s}$ .....50

FIG. 5.11 Resistência de folha R( $\text{Ohm}/\text{sq}$ ) dos filmes de TiGr2 e TiGr5 depositados nas taxas de  $1\text{\AA}/\text{s}$  e  $5\text{\AA}/\text{s}$  respectivamente, em função da absorção percentual.....51

FIG. 5.12 Percentual de absorção do TiGr2 em 10 GHz, depositados nas taxas de  $1\text{\AA}/\text{s}$ ,  $3\text{\AA}/\text{s}$  e

5Å/s, em função da espessura (Å).....52

FIG. 5.13 Percentual de absorção do TiGr4 em 10 GHz, depositados nas taxas de 1Å/s, 3Å/s e

5Å/s, em função da espessura (Å).....53

FIG. 5.14 Percentual de absorção do TiGr5 em 10 GHz, depositados nas taxas de 1Å/s, 3Å/s e

5Å/s, em função da espessura (Å).....53

FIG. 5.15 Percentual de absorção dos filmes de TiGr5 depositados na taxa de 1Å/s em função da faixa de frequência de 8 a 12 GHz.....54

FIG. 5.16 Percentual de absorção dos filmes de TiGr5 depositados na taxa de 3Å/s em função da faixa de frequência de 8 a 12 GHz.....54

FIG. 5.17 Percentual de absorção dos filmes de TiGr5 depositados na taxa de 5Å/s em função da faixa de frequência de 8 a 12 GHz.....55

FIG. 5.18 Microscopia Eletrônica de Varredura do TiGr5 depositado a uma taxa de 5Å/s na espessura de 30Å.....56

FIG. 5.19 Microscopia Eletrônica de Varredura do TiGr5 depositado a uma taxa de 5Å/s na espessura de 30Å.....57

FIG. 5.20 Espectro de EDS do filme de TiGr5 depositado a uma taxa de 5Å/s na espessura de

30Å.....57

FIG. 5.21 Percentual de Transmitância TiGr2 para taxa de 1Å/s na faixa de 200 a 800nm....58

FIG. 5.22 Percentual de Transmitância TiGr2 para taxa de 3Å/s na faixa de 200 a 800nm....58

FIG. 5.23 Percentual de Transmitância TiGr2 para taxa de 5Å/s na faixa de 200 a 800nm....59

FIG. 5.24 Percentual de Transmitância TiGr4 para taxa de 1Å/s na faixa de 200 a 800nm....59

FIG. 5.25 Percentual de Transmitância TiGr4 para taxa de 3Å/s na faixa de 200 a 800nm....60

FIG. 5.26 Percentual de Transmitância TiGr4 para taxa de 5Å/s na faixa de 200 a 800nm....60

FIG. 5.27 Percentual de Transmitância TiGr5 para taxa de 1Å/s na faixa de 200 a 800nm....61

FIG. 5.28 Percentual de Transmitância TiGr5 para taxa de 3Å/s na faixa de 200 a 800nm....61

FIG. 5.29 Percentual de Transmitância TiGr5 para taxa de 5Å/s na faixa de 200 a 800nm....62

## LISTA DE TABELAS

TAB. 4.1 Composição do material fonte utilizado.....	37
TAB. 5.1 Espessuras para a taxa de 1Å/s.....	43
TAB. 5.2 Espessuras para a taxa de 3Å/s.....	43
TAB. 5.3 Espessuras para a taxa de 5Å/s.....	44

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

### ABREVIATURA

TiGr2 – Titânio Grau 2

TiGr4 – Titânio Grau 4

TiGr5 – Titânio Grau 5

### SIMBOLOS

$\rho$  – Resistividade elétrica

$\epsilon$  – Permissividade

$\omega$  – frequência angular

$\mu$  – permeabilidade magnética

$t$  – Espessura do material

$R$  – coeficiente de reflexão

$s$  – Segundos

dB – Decibéis

$\delta$  – Profundidade pelicular

$E_i$  – Energia da radiação eletromagnética incidente

$E_r$  – Energia da radiação eletromagnética refletida

$E_t$  – Energia da radiação eletromagnética transmitida

$E_a$  – Energia da radiação eletromagnética absorvido

$R$  – Índice de Reflexão

T – Índice de Transmissão  
A – Índice de Absorção  
 $R_{sup}$  – Resistência superficial  
 $I_a$  – Intensidade da radiação  
 $\alpha$  – Coeficiente de absorção

## LISTA DE SIGLAS

ASTM – American Society for Testing and Materials  
IME – Instituto Militar de Engenharia  
LFF – Laboratório de Filmes Finos  
MARE – Material Absorvedor de Radiação Eletromagnética  
RCS – Radar Cross Section (Seção Reta Radar)  
PET – Politereftalato de etileno  
MEV – Microscópio Eletrônico de Varredura  
AFM – Microscópio de Força Atômica  
CTEx – Centro Tecnológico do Exército

## RESUMO

Este trabalho teve como objetivo a produção de filmes ultrafinos de titânio transparentes no espectro visível e absorvedores de micro-ondas na banda X (8-12 GHz) para uso em plataformas furtivas. Os filmes foram produzidos pela técnica de evaporação por feixe de elétrons nas taxas de 1 Å/s, 3 Å/s e 5 Å/s, com diferentes espessuras (20 Å, 25 Å, 30 Å, 40 Å, 50 Å e 75 Å), usando titânio com diferentes graus de pureza (TiGr2, TiGr4 e TiGr5). Os filmes foram depositados em substratos de vidro com dimensões de 24 × 24 mm<sup>2</sup> e 24 × 12 mm<sup>2</sup> e caracterizados por absorção de micro-ondas, transmitância na faixa da luz visível e medidas elétricas. Os resultados mostraram que a absorção de micro-ondas é diretamente proporcional à taxa de deposição e inversamente proporcional ao grau de pureza do titânio e à espessura do filme.

## ABSTRACT

The purpose of this work was to produce ultrathin titanium films that are transparent in the visible range and absorb microwaves in the X band (8-12GHz) for use in stealth platforms. The films were made by the electron beam evaporation technique at rates of 1 Å/s, 3 Å/s and 5 Å/s, with different thicknesses (20 Å, 25 Å, 30 Å, 40 Å, 50 Å e 75 Å), using titanium with different degrees of purity (TiGr2, TiGr4 and TiGr5). The films were deposited on glass substrates with dimensions of  $24 \times 24 \text{ mm}^2$  and  $24 \times 12 \text{ mm}^2$  and characterized by microwave absorption, transmittance in the visible range and electrical measurements. The results show that the microwave absorption is directly proportional the deposition rate as inversely proportional to the titanium degree of purity and to the film thickness.

## 1 INTRODUÇÃO

A camuflagem é uma das maneiras mais eficazes de surpreender o inimigo. O ataque surpresa aumenta as chances de sucesso, minimizando as possibilidades de reação do inimigo. Os uniformes utilizados pelos soldados são hoje um artefato de disfarce aplicado nos campos de guerra. De modo semelhante, os veículos utilizam como camuflagem as pinturas aplicadas na lataria de acordo com o ambiente de guerra, como desertos e florestas. Para veículos aéreos a camuflagem está além de pinturas ou uniformes, possuindo tecnologia que os permite a invisibilidade ou a diminuição da detecção exercida por radares.

O uso do radar para detecção de veículos tornou-se realidade na década de 20, no período entre guerras. Este período ficou marcado pelas aplicações tecnológicas de guerra como o uso do radar na identificação de veículos furtivos. Em função disso, já se buscavam formas de enganar o radar. Uma das maneiras encontradas para camuflar as aeronaves foi com o uso de artifícios (*chaffs*). Esta técnica consistia em lançar tiras de alumínio ou fibra de vidro durante o voo, criando uma espécie de nuvem refletindo a frequência emitida pelo radar [SHEFFIELD, 1989].

Durante este período de guerras, os alemães criaram o jato GO 229, apresentado na FIG. 1.1, uma aeronave projetada por dois irmãos alemães, Luftwaffe Walter Horten e Oberleutnant Reimar Horten, que tinham experiência com planadores sem cauda [ASAS DE FERRO, 2015].

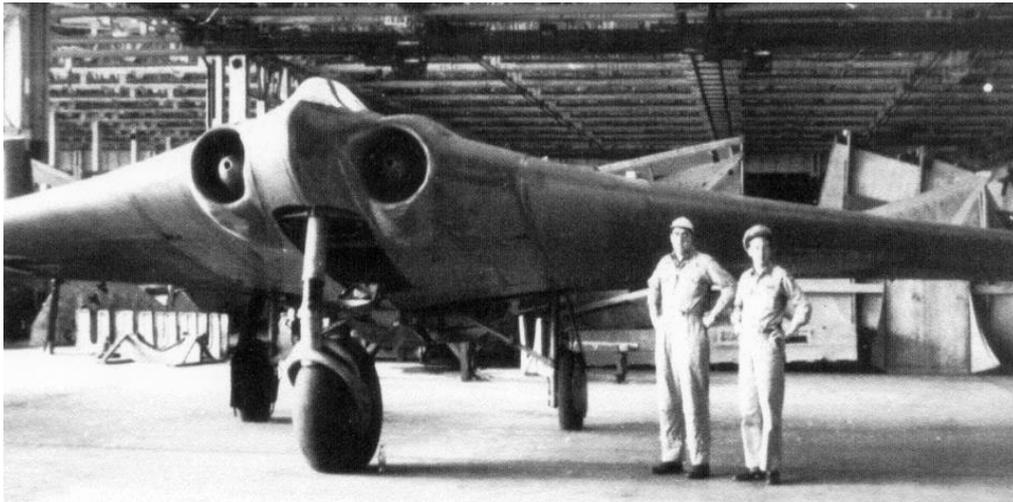


FIG. 4.1. Jato GO 229 [ASAS DE FERRO, 2015]

Os irmãos Horten descobriram que se construíssem aeronaves com asas de madeira com a curvatura correta e estável seria possível pilotá-las. A aeronave foi construída com o objetivo de diminuir o arraste durante o voo. Em meio aos testes perceberam que o avião não era detectado pelos radares da época, desde então viram a possibilidade de usá-lo como veículo furtivo. Porém, com os avanços da época, viram que a geometria da aeronave não satisfazia mais as necessidades de um veículo *stealth*. [SISTEMA DE ARMAS, 2016].

A partir deste momento, combinaram a geometria da aeronave com uma pintura a base de cola e carvão com o objetivo de enganar o radar. Sendo assim, começaram a fabricar as aeronaves furtivas utilizadas em combate.

Com os adventos da tecnologia, estruturas capazes de identificar veículos aéreos, terrestres e marítimos foram desenvolvidas e evoluíram. Desde então, pesquisadores que atuam na área de defesa buscam uma maneira de impedir que equipamentos de identificação detectem veículos em combate.

Em 1966 surge Lockheed SR-71 conhecido como Blackbird, como mostra a FIG. 1.2, aeronave furtiva de baixa detecção capaz de absorver a radiação emitida pelo radar [SR-71, 2016].



FIG. 1.5. Lockheed SR-71 [SR-71, 2016].

Um exemplo de veículo furtivo marítimo é o M-80 Stiletto, da marinha dos Estados Unidos projetado com baixa detecção ao radar, apresentado na FIG. 1.3.[NAVAL TECHNOLOGY, 2016].



FIG. 1.6. M-80 Stiletto [NAVAL TECHNOLOGY, 2016].

Hoje são desenvolvidas pesquisas na criação e aperfeiçoamento de estruturas ópticas que atuam como absorvedores de radiação eletromagnética na faixa de micro-ondas. Os materiais que constituem estas estruturas são normalmente chamados de MARE (Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética). Estes materiais são denominados assim por possuírem propriedades que permitem a transformação da radiação eletromagnética incidente, na faixa de micro-ondas, em energia térmica.

Os MARE podem atuar como absorvedores de micro-ondas ou como blindagem eletromagnética. Os que atuam como absorvedores de micro-ondas são caracterizados por

terem um alto percentual de radiação absorvida e um baixo percentual de radiação transmitida, desprezando a radiação refletida. Aqueles que atuam como blindagens eletromagnéticas são caracterizados por possuírem uma alta refletividade ou um alto percentual de absorção, minimizando a radiação transmitida.

Alguns MARE na forma volumétrica podem ser obtidos através da impregnação de uma matriz polimérica com centro absorvedor de radiação como negro de fumo, polímeros condutores ou ferritas [MIGLIANA, 2002]. Eles possuem elevada densidade específica, alto custo de fabricação, difícil modelagem e elevada espessura. Os MARE na forma de filmes finos apresentam vantagens em relação aos tradicionais como baixa densidade específica, baixo custo de fabricação, espessuras da ordem de Angstroms e transmitância da radiação visível.

Os mecanismos de interação da radiação eletromagnética com os MARE na forma de filmes finos metálicos estão associados a processos de perda. Estes processos são baseados na dissipação da energia incidente na forma de calor. Um dos argumentos que se destaca neste processo de perda é a impedância do revestimento metálico que está relacionada com sua resistividade. Sendo assim, filmes finos apresentam-se como materiais que podem ser usados como MARE para diversas aplicações em substituição aos convencionais.

## 1.1 MOTIVAÇÃO

Algumas das aplicações dos materiais absorvedores de radiação eletromagnética ocorrem no meio militar e civil. Exemplo disso é o desenvolvimento de sistemas de telecomunicações e eletroeletrônicos no setor civil, onde torna-se necessária a utilização desses materiais visando a proteção desses sistemas, para que equipamentos que atuam no mesmo espaço físico a pequenas distâncias não sofram interferência.

O desenvolvimento de tecnologias furtiva no cenário mundial possui grande visibilidade devido a seu potencial militar, onde o domínio desta tecnologia proporciona ao país que a possui grande capacidade militar de caráter estratégico de defesa.

Para assemelhar o Brasil a outros países no desenvolvimento de tecnologia furtiva, este trabalho tem o intuito de dar continuidade às pesquisas iniciadas no Instituto Militar de Engenharia (IME), pelo Laboratório de Filmes Finos (LFF) com apoio do Centro Tecnológico do Exército (CTEx). Além disso, com a utilização desse material nos para-brisas e janelas, pode-se solucionar problemas de reflexões provocadas pelas cabines onde se encontram pilotos ou motoristas dos veículos de combate.

## 1.2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho de dissertação foi a obtenção de filmes ultrafinos e transparentes no espectro visível que apresentem alta capacidade de absorção de micro-ondas na faixa de 8 a 12 GHz, também chamada de Banda X.

## 2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 2.1 ABSORVEDORES DE MICRO-ONDAS

Atualmente existem diversos materiais capazes de absorver a radiação eletromagnética na faixa de micro-ondas. Dentre eles podemos citar: negro de fumo; nanotubos de carbono; polímeros condutores; compósitos de ferrita e filmes finos [AFGHAHI, 2016; PINTO, 2012; DANTAS, 2011].

Como exemplo de aplicabilidade, os polímeros condutores, assim como o negro de fumo, possuem boa resistência à corrosão e controle de resistividade elétrica. Por isso, estes materiais têm recebido grande atenção para aplicações como absorvedores de micro-ondas [DANTAS, 2011].

Entretanto, em algumas situações, seu uso perde aplicabilidade devido à sua alta densidade e elevados custos em seu processamento. Logo, os filmes finos assumem um papel importante no setor de defesa com empregabilidade óptica usada em veículos de combate.

Uma das aplicações de MARE na forma de filmes, no setor estratégico de defesa, apresenta-se na forma de revestimentos internos ou externos de superfícies de veículos aéreos, terrestres e marítimos, com a finalidade de não serem detectados pelos radares, por meio da redução da refletividade da radiação eletromagnética incidente.

Essencialmente existem três formas de reduzir a intensidade da radiação eletromagnética incidente. Uma delas é baseada no cancelamento de fases da radiação incidente (interferência). Outra, no espalhamento da radiação eletromagnética incidente em direções diferentes (geometria da superfície). Por fim, o mecanismo de perdas magnéticas e dielétricas dentro da faixa de frequências de interesse, sendo esta a utilizada neste trabalho.

O mecanismo de cancelamento de fases é caracterizado por utilizar filmes resistivos posicionados a uma distância igual a um quarto do comprimento de onda da radiação incidente, tomando-se como referência a posição da superfície do condutor que se quer reduzir. Em um determinado comprimento de onda, a radiação incidente e a refletida no material se cancelam, promovendo interferência destrutiva. Uma forma de garantir este espaçamento entre o material e a superfície condutora é o uso de uma estrutura composta de orifícios na forma circular [NEELAKANTA, 1995].

Já no mecanismo de espalhamento da radiação eletromagnética, a geometria dos absorvedores é um fator importante, pois a atenuação da onda eletromagnética depende da

rugosidade da superfície ou da diferença de nivelamento. Devido a variação dos níveis das superfícies (baixa e alta), ocorrem múltiplas reflexões superficiais da onda eletromagnética. Logo, a onda refletida no plano é absorvida em outro plano. Desta forma, a intensidade da radiação diminui devido às múltiplas reflexões superficiais.

Os MARE baseados no mecanismo de perdas dielétricas são caracterizados pela interação do componente do campo elétrico da onda eletromagnética com os elétrons presentes no material, caso dos polímeros condutores [WALLACE 1993]. Estes materiais retratam baixos valores de permissividade real ( $\epsilon'$ ) e indicam elevados traços de perdas ( $\epsilon''$ ). Já os MARE, baseados em perdas magnéticas, são caracterizados pela interação entre a componente de campo magnético da onda eletromagnética incidente por Efeito Joule devido à geração de correntes parasitas [WALLACE 1993].

Alguns filmes finos se encaixam perfeitamente como absorvedores de radiação eletromagnética.

A FIG. 2.1 representa a interação da radiação com a matéria e é expressa pela EQ 2.1.

$$E_i = E_r + E_a + E_t \quad \text{EQ 2.1}$$

sendo  $E_i$  energia da onda eletromagnética incidente,  $E_r$  energia da onda eletromagnética refletida,  $E_a$  energia da onda eletromagnética absorvida e  $E_t$  energia da onda eletromagnética transmitida.

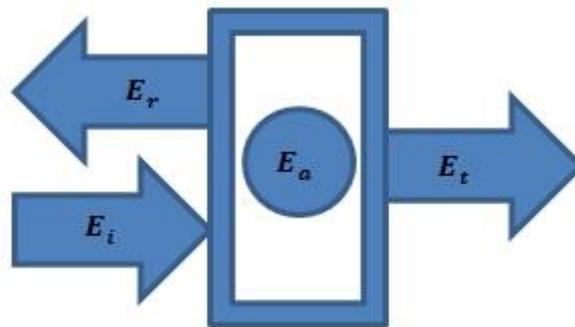


FIG. 2.1. Interações do material com radiação eletromagnética

Para o caso de um material absorvedor, a condição ideal pode ser descrita na EQ. 2.2, sendo a componente refletida desprezada e a energia absorvida é a maior possível.

$$E_i = E_a + E_t \quad \text{EQ. 2.2}$$

## 2.2 PROPRIEDADES ELÉTRICAS

As propriedades elétricas de um material são influenciadas por suas características. No caso de filmes finos a técnica de deposição, a taxa de deposição, a presença de defeitos e a espessura do material influenciam diretamente nas propriedades elétricas dos filmes finos. Desta forma, a resistividade elétrica de materiais na forma de filmes finos é diferente da resistividade normalmente encontrada em tabelas para materiais volumétricos.

Essa diferença está baseada no fato que a concentração de defeitos em um material pode ser considerada como centros espalhadores de elétrons. Portanto, o aumento de defeitos influencia de maneira significativa nos valores de resistividade; quanto maior a concentração de defeitos maior será o valor de resistividade. Algumas pesquisas têm mostrado que a resistividade de filmes finos apresenta valores inversamente proporcionais aos valores de sua espessura, ou seja, quanto menor a espessura dos filmes, maior o valor de resistividade [VRIES, 1988].

## 2.3 PROFUNDIDADE PELICULAR (SKIN DEPTH)

Sabe-se que os materiais metálicos na forma volumétrica são refletores da radiação eletromagnética e esta característica está associada às propriedades elétricas dos metais. Entretanto, para menores espessuras, da ordem de angstroms, observam-se os altos valores de resistividade e a potencialização da componente de absorção [PARK, 2009]. A espessura reduzida do filme, seus altos valores de resistividade e uma alta densidade de defeitos resultam em uma forte absorção da radiação em função da formação de correntes na superfície do material, que são aprisionadas pelos defeitos, que funcionam como centros espalhadores de elétrons, transformando a energia incidente em energia térmica por Efeito Joule. Em função do exposto, para que um material seja um bom absorvedor de radiação, deseja-se que sua espessura seja inferior à camada de interação entre a radiação e o material absorvedor, camada esta chamada de profundidade pelicular (*skin depth*) e que o material tenha a máxima resistividade possível.

As correntes superficiais supracitadas são chamadas de Correntes de Foucault ou correntes parasitas. Em dispositivos eletrônicos estas correntes podem produzir resultados indesejáveis, pois podem danificar os dispositivos em função do calor gerado por Efeito Joule em sua dissipação.

Entretanto, estas correntes parasitas são benéficas quando se deseja gerar calor para aquecer materiais, como no caso dos fornos cujo aquecimento se dá por indução magnética, na frenagem de trens controlados por ímãs magnéticos, nas balanças de precisão, na medição da condutividade elétrica de metais não magnéticos, etc.

Estas correntes são geradas de acordo com os seguintes conceitos físicos:

- quando um campo magnético variável de alta frequência incide em um material metálico, estabelece-se um campo elétrico induzido na superfície deste material;
- o campo elétrico induzido dá origem ao surgimento de uma corrente elétrica (corrente de Foucault) na superfície do material. O movimento dos elétrons dá origem a uma corrente em circuitos fechados. Por isso, com frequência é utilizada a expressão em inglês de “eddy current”, em função de seu formato, para as correntes de Foucault. Entretanto, muitas vezes esta denominação (corrente Eddy) é utilizada erroneamente em português;
- se o material no qual estas correntes são induzidas tiver uma alta resistividade, haverá uma intensa dissipação por Efeito Joule, aquecendo-o.

Como comentado anteriormente, as correntes de Foucault são geradas na superfície dos materiais metálicos. Portanto, se o objetivo for produzir um material que atue como absorvedor de radiação eletromagnética, a espessura do material deve ser da ordem da profundidade pelicular (skin depth). Os valores da profundidade de pelicular ( $\delta$ ) podem ser obtidos através da EQ. 2.3 [ROBERT, 2000].

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi\mu\omega}} \quad \text{EQ. 2.3}$$

onde  $\rho$  é a resistividade do material,  $\mu$  é a sua permeabilidade magnética do material e  $\omega$  é frequência angular de propagação da radiação eletromagnética.

A resistência superficial do meio ( $R_{\text{sup}}$ ) também pode ser escrita em termos da profundidade pelicular e da resistividade elétrica do material conforme EQ 3.4 [KRAUS, 1986; EDMINISTER, 2014].

$$R_{\text{sup}} = \frac{\rho}{\delta} \quad \text{EQ 2.4}$$

## 2.4 TRANSMITÂNCIA ÓPTICA

Sabe-se que as propriedades ópticas dos materiais são oriundas da relação entre a radiação eletromagnética e os elétrons do material. Além disso, as impurezas, os defeitos e a espessura influenciam estas propriedades [KASAP, 2007].

O principal emprego para o filme estudado é na absorção de radiação eletromagnética na faixa de micro-ondas. Uma possibilidade de uso comercial, como mencionado anteriormente, é em para-brisas e janelas de aeronaves e veículos terrestres. Portanto, uma condição necessária é que estes filmes devem ser transparentes dentro do espectro visível de radiação eletromagnética.

O fato de serem utilizados filmes ultrafinos em função da necessidade de se trabalhar na profundidade pelicular, facilitará o segundo objetivo experimental, pois, como se sabe, a intensidade da radiação eletromagnética absorvida é proporcional a espessura do material considerado, na faixa do visível de acordo com a EQ 3.5, dada por:

$$I_a = I_o e^{-\alpha t} \quad \text{EQ 2.5}$$

onde  $I_a(t)$  é a intensidade da radiação na espessura  $t$  e  $\alpha$  é o coeficiente de absorção do material para o comprimento de onda analisado.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Uma grande variedade de materiais tem sido estudada para emprego como absorvedor de micro-ondas e tem permitido a obtenção de diferentes resultados para diversas aplicações.

Materiais na forma de filmes finos, fibra de vidro com polímero condutor, e ferritas são alguns dos materiais utilizados na produção de MARE.

Em se tratando de MARE à base de filmes finos, materiais como alumínio, prata, ferro, níquel, titânio, algumas ligas de Kantal (Fe-Cr-Al), entre outros, têm sido utilizados na fabricação de materiais absorvedores de micro-ondas visando à obtenção de materiais altamente absorvedores de micro-ondas para diferentes aplicações.

Pesquisadores depositaram filmes finos de titânio, utilizando a técnica de pulverização catódica, com espessuras de 137Å, 141Å e 216Å, sobre substratos de ferrita com espessuras iguais a 1,65mm e 3,18mm. Os filmes apresentaram resistividades que variaram de 210 a 250Ω/□. Utilizando um analisador de guia de ondas realizaram medidas de absorção antes e após a deposição dos filmes de titânio sobre os substratos de ferrita. Os filmes depositados sobre substratos com espessura de 1,65mm apresentaram eficiência da absorção em aproximadamente 70,8% e para espessura de 3,18mm a eficiência foi de 56,2% [SUN e MCGINNIS, 1999].

Em outro trabalho, Liu depositou filmes finos de cobre. Liu observou que a relação entre a resistividade de um filme fino de cobre em função de sua espessura, apresentado na FIG. 3.1. O pesquisador atribuiu a variação de resistividade com o fato da distribuição de defeitos na rede cristalina ser da mesma ordem de grandeza que o livre caminho médio dos elétrons. Desta forma há um grande espalhamento de elétrons [LIU, 2001].

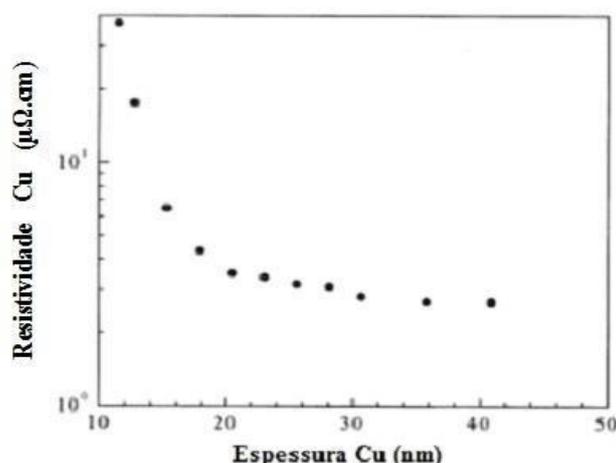


FIG. 3.1. Resistividade do filme de Cu em função da espessura (adaptado: LIU, 2001)

Em 2008, no Centro Tecnológico da Aeronáutica, foram realizados estudos com filmes finos de alumínio de várias espessuras depositados por Triodo Magnetron Sputtering a pressão de 2mTorr sobre substratos de PET (politeraftalato de etileno). Os autores observaram que o conjunto filme/substrato tem capacidade de absorver a radiação eletromagnética incidente na faixa de micro-ondas de 8 a 12GHz. Medidas de refletividade realizadas pela técnica de guia de onda mostraram que a atenuação da energia obtida pelos filmes depende diretamente da espessura dos mesmos. Filmes com espessuras na faixa de 65nm a 200nm apresentaram atenuação da energia da radiação eletromagnética entre 60 e 90% em diferentes frequências. Os pesquisadores concluíram que os resultados obtidos têm relação direta com o *skin depth*. Filmes com espessuras mais próximas do valor do *skin depth* do alumínio apresentam resultados de absorção mais significativos, porém em uma menor faixa de frequências [SOETHE, 2008].

Pesquisadores produziram filmes finos de cobre por pulverização catódica com diferentes espessuras para serem utilizados como contatos elétricos em dispositivos eletrônicos. Observaram que há um aumento da resistividade com diminuição da espessura, como mostra a FIG. 3.2.[MECH 2011].

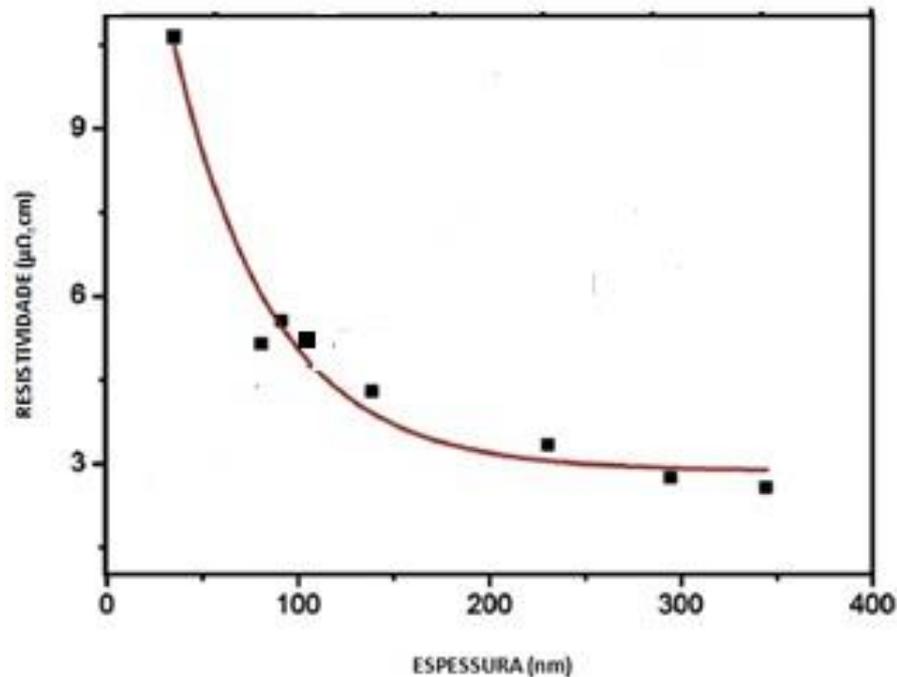


FIG. 3.2 Relação entre espessura e resistividade em filmes de Cu. (Adaptado: MECH 2011)

Em 2011, Soethe e seus colaboradores avaliaram a possibilidade de utilização de filmes finos de titânio como materiais absorvedores de micro-ondas. Eles utilizaram a técnica de pulverização catódica para produzir filmes com espessura entre 25 e 100nm, com taxa de deposição de 5,0nm/s, depositados sob substratos poliméricos e de silício monocristalino. Eles concluíram que o conjunto filme/substrato foi capaz de absorver a micro-onda na faixa de 8 a

12 GHz, o que permitiu prever sua aplicação em materiais furtivos. Análises por guia de ondas permitiram avaliar a absorção da radiação eletromagnética foi de 20 a 50%. Além disso, foram realizadas medidas de resistividade que possibilitaram estabelecer relação entre a espessura e a absorção de micro-ondas do filme. Baseado nas análises de guias de ondas foi possível avaliar que o filme de 25nm apresentou absorção próxima a 45% e que os filmes com espessura acima de 100nm tiveram menos sucesso como absorvedores de micro-ondas, apresentado na FIG. 3.3. Assim, a diminuição da espessura favorece o mecanismo de perdas no filme [SOETHE, 2011].

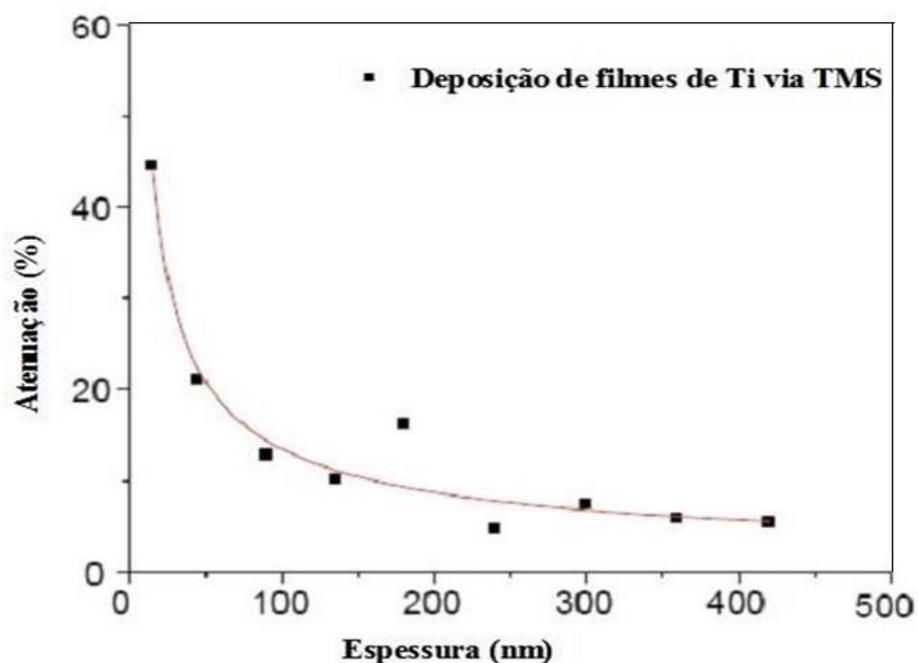


FIG. 3.3 Relação entre o percentual de atenuação da radiação eletromagnética e a espessura

Em 2011, no Instituto Militar de Engenharia (IME), foram realizados estudos com filmes finos de Kanthal com espessuras entre 20 e 112,2nm depositados sobre substrato Mylar utilizando a técnica de evaporação do tipo *flash* e sem aquecimento do substrato. Foram realizadas medidas de reflexão e transmissão na faixa de micro-ondas de 8 a 12GHz. Os pesquisadores observaram que os filmes apresentaram absorção máxima de 48% para uma espessura de 29,2 nm, possibilitando sua aplicação como absorvedor de micro-ondas. O filme com espessura de 86,2 nm apresentou 95% de atenuação da radiação transmitida, apresentando-se como uma excelente blindagem eletromagnética. [SILVA, 2011].

Em outro trabalho, foi realizado um estudo sobre transmitância óptica na faixa espectral de 200 a 1100nm, em filmes finos metálicos para aplicações em fotodetectores. As técnicas de deposições utilizadas foram a pulverização catódica e evaporação resistiva e os filmes foram

depositados em substratos de vidro. Os pesquisadores constataram que com o aumento da espessura a transmitância diminuiu, como mostra a FIG. 3.4.[AXELEVITCH 2012].

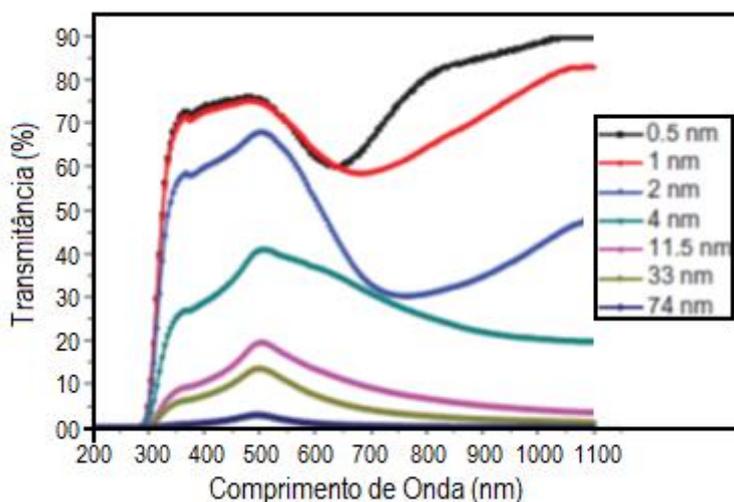


FIG. 3.4 Transmitância óptica dos filmes finos de Au. (Adaptado: AXELEVITCH 2012)

Panta e Subedi realizaram a caracterização elétrica do Al depositado por evaporação por feixe de elétrons. Os autores constataram, também, que a resistividade dos filmes diminuiu com espessura como mostra a FIG. 3.5. [PANTA, 2012].

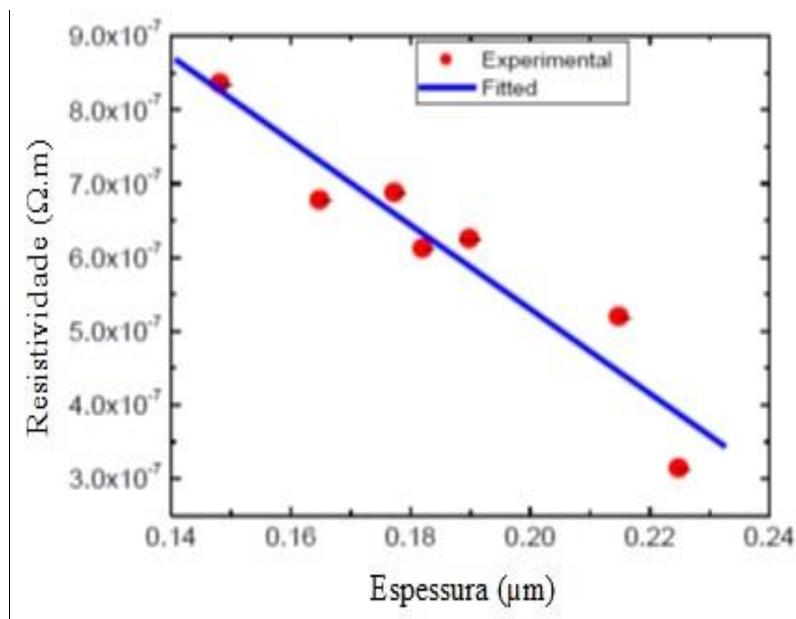


FIG. 3.5 Variação da resistividade elétrica em função da espessura de filmes finos de Al (Adaptado: PANTA 2012)

Recentemente, pesquisadores avaliaram a relação entre a microestrutura e a resistividade de filmes de Cu e Ni puros, liga de CuNi e filmes bicamadas Cu/Ni [LOUDJANI, 2015]. Constataram que o aumento da resistividade dos filmes depositados por pulverização

catódica está diretamente ligado com o aumento do número de defeitos presentes nos filmes. Os valores de resistividade foram obtidos pela técnica de quatro pontas alinhadas.[LOUDJANI, 2015].

As FIG. 3.6 e 3.7 (carlos) mostram a relação entre os valores de resistividade dos filmes finos de níquel e cobre, com a espessura, antes e depois do recozimento realizado durante 90 minutos a 498°C. Nota-se uma diminuição na resistividade dos filmes de cobre e níquel após o recozimento. Os pesquisadores relacionaram a diminuição na resistividade com a concentração de defeitos. Constataram que o processo de recozimento provoca a diminuição do número de defeitos e como consequência desta diminuição, ocorre a redução no valor da resistividade [LOUDJANI, 2015].

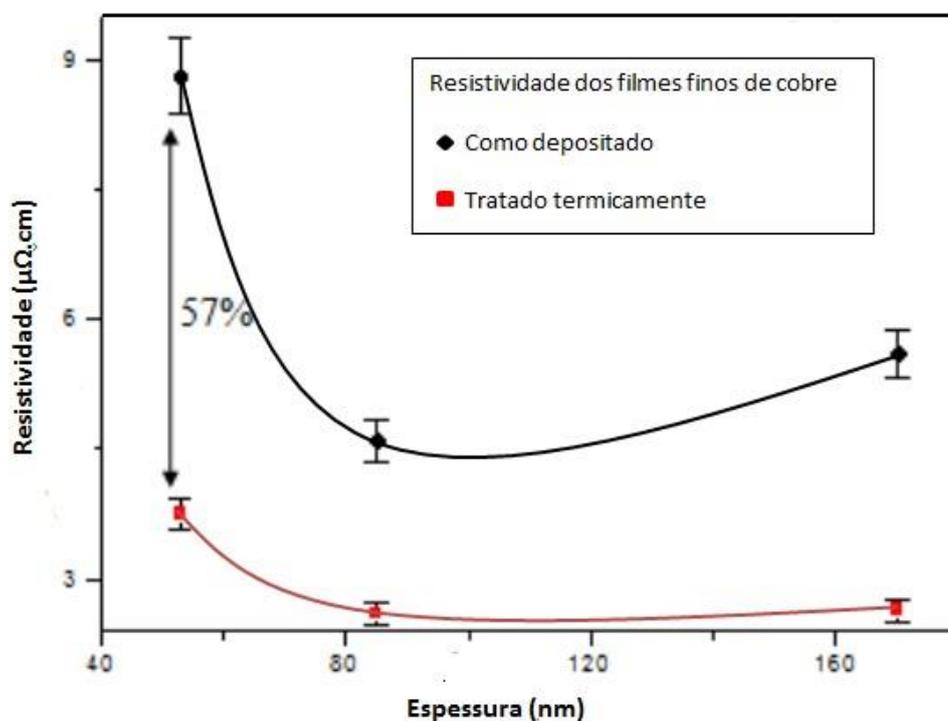


FIG. 3.6 Efeito do tratamento térmico a uma temperatura de 498°C na resistividade dos filmes finos de cobre (Adaptada: LOUDJANI, 2015)

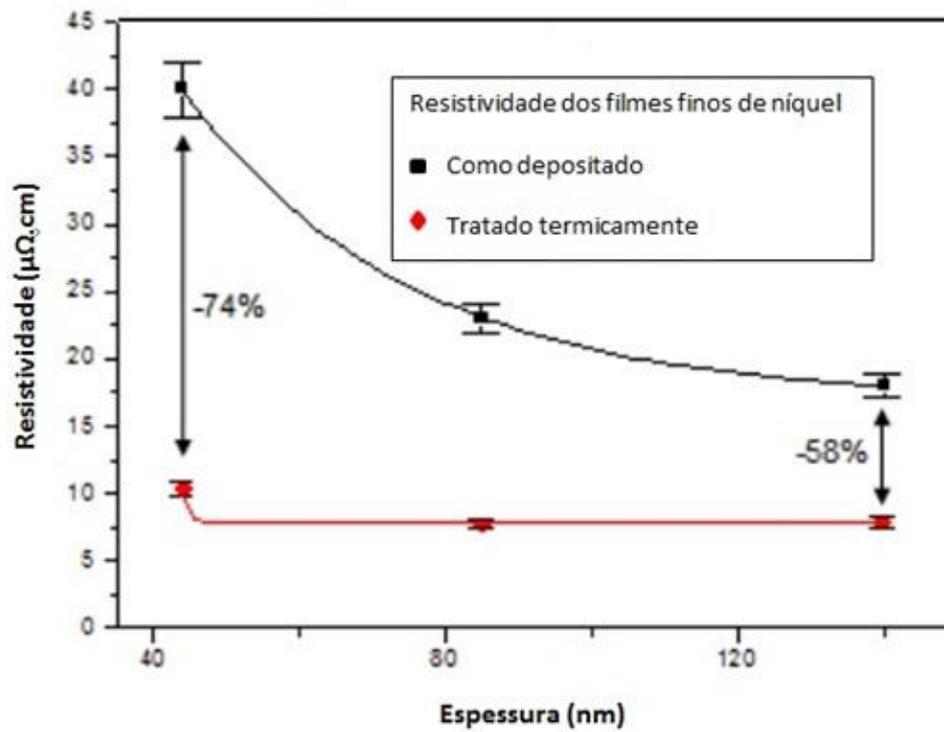


FIG. 3.7 Efeito do tratamento térmico a uma temperatura de 498°C na resistividade dos filmes finos de níquel (Adaptada: LOUDJANI, 2015)

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo da dissertação serão apresentados os materiais utilizados na execução do trabalho, as características do sistema de vácuo onde os filmes finos foram produzidos, bem como os equipamentos que possibilitaram a caracterização das amostras.

### 4.1 EVAPORAÇÃO POR FEIXE DE ELÉTRONS

Para a produção dos filmes foi utilizada uma evaporadora marca Edwards, modelo 19A, instalada no Laboratório de Filmes Finos do IME. A FIG. 4.1 mostra uma foto do sistema de deposição utilizado.



FIG. 4.1 Evaporadora da Edwards, modelo 19A

A pressão base das deposições foi de  $2 \times 10^{-6}$  Torr obtida por sistema de vácuo constituído de uma bomba de difusão com armadilha criogênica e uma bomba mecânica selada a óleo.

Para evaporação dos filmes foi utilizado um feixe de elétrons gerado por um canhão da marca Edwards, modelo EB3, operando numa tensão de 5kV

## 4.2 MATERIAL EVAPORANTE

Foi utilizado como material fonte o titânio com diferentes graus de pureza fabricados pela empresa SANDINOX. O material originalmente estava na forma de tarugos cilíndricos com diâmetro de 3, 4 e 6mm para os materiais denominados como TiGr2, TiGr4 e TiGr5, respectivamente, todos com comprimento 250mm. As denominações TiGr2, TiGr4 e TiGr5 correspondem aos diferentes graus de purezas do titânio de acordo com a nomenclatura da *American Society for Testing and Materials (ASTM)* [ASTM, 2000].

Os tarugos foram cortados com comprimentos aproximados de 4mm para serem acondicionados nos cadinhos de grafite utilizados na evaporação. Os pedaços do material fonte foram fundidos no interior dos cadinhos de grafite, utilizando o próprio feixe de elétrons, sem evaporá-los. A TAB. 4.1 apresenta a composição dos diferentes graus de titânio utilizados.

TAB. 4.2 Composição do material fonte utilizado

Elemento	Ti Gr2	Ti Gr4	Ti Gr5
	(%)	(%)	(%)
O	0,25	0,40	0,20
N	0,03	0,05	0,05
C	0,08	0,08	0,08
H	0,015	0,015	0,015
Fe	0,30	0,50	0,40
Al	-	-	5,50 – 6,75
V	-	-	3,50 – 4,5
Ti	99,32	98,95	88,0 – 90,61

Observa-se que o TiGr4 é mais impuro que o TiGr2 e que TiGr5 é o mais impuro entre os materiais fonte utilizados.

O principal diferencial deste trabalho com relação aos demais encontrados na literatura está na utilização de um titânio comercial (impuro). Desta forma, procurou-se utilizar as impurezas do material fonte utilizado para aumentar a resistividade elétrica dos filmes produzidos, quando comparados aos produzidos com titânio de alta pureza (99.99%).

## 4.3 SUBSTRATO

Os filmes finos foram depositados em substrato de vidro com dimensões de  $24 \times 24 \text{ mm}^2$  e  $24 \times 12 \text{ mm}^2$  como mostra a FIG. 4.2. Os substratos rotulados como P1 foram utilizados para caracterizações de absorção de micro-ondas e os substratos P2 para caracterizações morfológicas e óptica no faixa espectral visível. Nas caracterizações elétricas foram utilizados os rotulados como P3.

Os substratos foram submetidos aos procedimentos de limpeza estabelecidos no Laboratório de Filmes Finos do IME que podem ser resumidas como se segue:

- retirada de gordura com um tecido umedecido com éter de petróleo;
- imersão em uma solução aquecida constituída de água destilada e sabão neutro;
- retirada do sabão por meio da agitação ultrassônica durante 15 minutos;
- imersão em água destilada aquecida tantas vezes quanto necessário para a retirada do sabão remanescente;
- secagem em estufa.

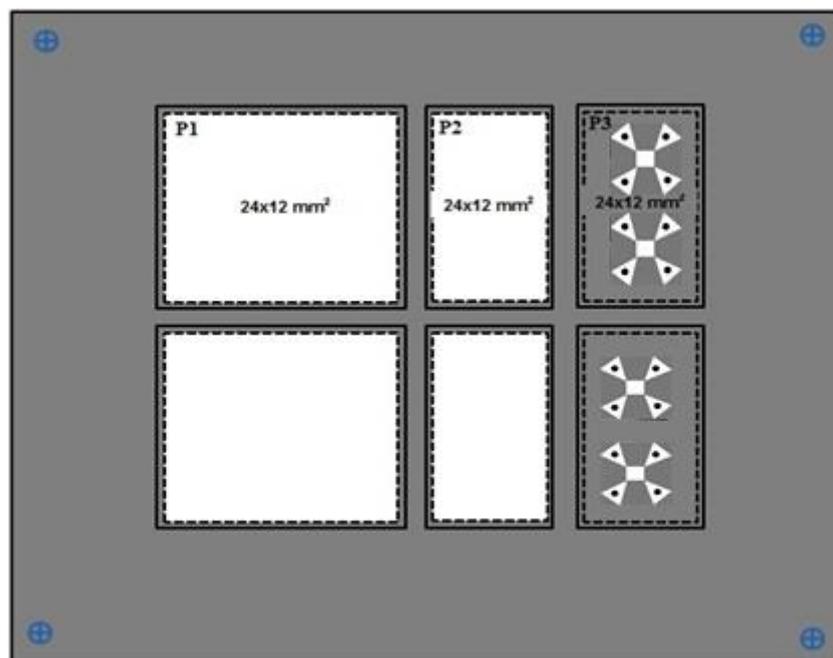


FIG. 4.2 Máscara utilizada nas deposições

#### 4.4 PERFILOMETRIA

Foi empregada a técnica de perfilometria para determinação da espessura dos filmes finos produzidos. O equipamento utilizado foi o perfilômetro marca Veeco, modelo Dektak 150 do Laboratório de Filmes Finos do IME.

#### 4.5 RESISTIVIDADE

As resistividades dos filmes foram obtidas utilizando o equipamento fabricado pela BIO-RAD, modelo Hall Effect Measurement System HL, 5500 ilustrado na FIG. 4.3. Foi utilizada a configuração de contatos característica do método de medida Van der Pauw. O arranjo utilizado para as medidas elétricas é o chamado trevo de quatro folhas, cuja ilustração pode ser vista na FIG. 4.4.

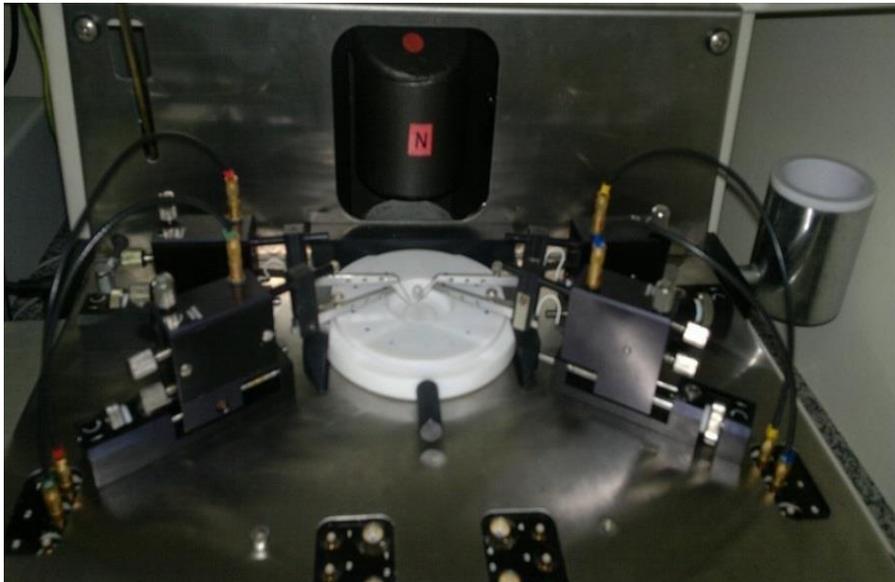


FIG. 4.3 Medidor de resistividade BIO-RAD

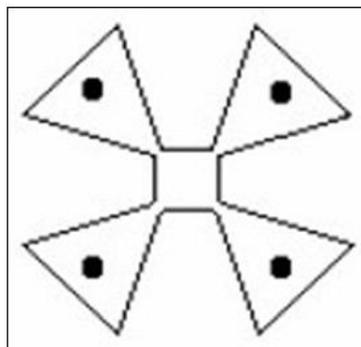


FIG. 4.4 Geometria para medidas elétricas

#### 4.6 REFLETÂNCIA E TRANSMITÂNCIA DE MICRO-ONDAS NA FAIXA DE 8 A 12GHz

As medidas de refletância e transmitância na faixa de micro-ondas foram realizadas por de um analisador de rede marca Anritsu, modelo 37247D, instalado no Laboratório de Medidas Elétricas do Centro Tecnológico do Exército. Este equipamento possibilita a obtenção simultânea dos sinais refletido e transmitido nas portas 1 e 2, como ilustrado na FIG. 4.5.

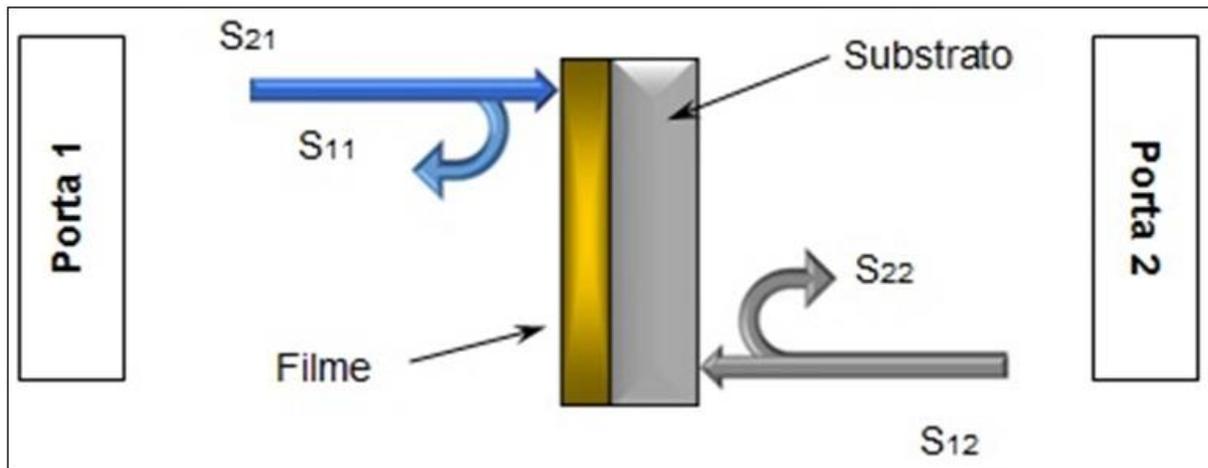


FIG. 4.5 Ilustração do método de medida por um analisador de rede [Figura retirada de SILVA, 2014]

Esta configuração permite a caracterização do conjunto filme/substrato com a incidência tanto pelo lado do filme (porta 1) quanto pelo substrato (porta 2).

De posse destes sinais é possível calcular os parâmetros  $S_{11}$  e  $S_{21}$  correspondente aos sinais refletido e transmitido. Respectivamente os parâmetros  $S$  podem ser entendidos como a razão entre a tensão da onda incidente e a tensão da onda refletida ou transmitida (EQ 4.1 e 4.2). O quadrado destes parâmetros define a razão entre as potências, (EQ 4.3 e 4.4), determinando os coeficientes de reflexão e transmissão. A faixa de frequências utilizada foi de 8 a 12 GHz.

$$|S_{11}| = \left| \frac{\text{Potência refletida na Porta 1}}{\text{Potência incidente na Porta 1}} \right| \quad \text{EQ 4.1}$$

$$|S_{21}| = \left| \frac{\text{Potência transmitida na Porta 2}}{\text{Potência incidente na Porta 1}} \right| \quad \text{EQ 4.2}$$

Sendo:

$$|S_{11}|^2 = R_1 \quad \text{EQ 4.3}$$

$$|S_{21}|^2 = T_1 \quad \text{EQ 4.4}$$

No presente trabalho serão utilizados somente os parâmetros  $S_{11}$  e  $S_{21}$ , pois o interesse é avaliar a capacidade de absorção do filme fino. Ou seja, será utilizada somente a radiação incidente pelo lado da superfície do filme e não pelo substrato.

#### 4.7 TRANSMITÂNCIA ÓPTICA

Um dos empregos destes materiais é em para-brisas de aeronaves e veículos. Portanto, é desejável que os filmes produzidos apresentem alta transparência na faixa visível do espectro eletromagnético. Deste modo, medidas de transmitância de luz visível foram realizadas no Laboratório de Filmes Finos do IME utilizando um espectrofotômetro marca Varian, modelo Cary 5000, como mostra a FIG. 4.6.



FIG. 4.6 Foto do Espectrofotômetro Cary 5000.

#### 4.8 MICROSCOPIA ELETRÔNICA

Análises morfológica dos filmes foram realizadas por meio da microscopia eletrônico de varredura (MEV FEG – FEI, Quanta 250) do laboratório de microscopia do Instituto Militar de Engenharia. Estas análises permitiram avaliar a continuidade dos filmes depositados.

### 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 5.1 DETERMINAÇÃO DAS ESPESSURAS

As espessuras dos filmes finos produzidos para o desenvolvimento desta dissertação não foram medidas e sim estimadas, em função do limite de resolução dos equipamentos disponíveis no Laboratório de Filmes Finos.

Para controlar a taxa de deposição foi utilizado um monitor de espessura (cristal de quartzo). O procedimento necessário para a calibração do cristal de quartzo envolveu as seguintes etapas:

- Ajuste dos parâmetros do Ti: Densidade ( $4,5 \text{ g/cm}^3$ ) e fator  $z$  (0,628). O fator  $z$  é definido pela EQ. 5.1.

$$\text{Fator } z = \left( \frac{D_q U_q}{D_f U_f} \right)^{1/2} \quad \text{EQ. 5.1}$$

Onde  $D_q$  e  $D_f$  são as densidade do cristal de quartzo e do filmes respectivamente;  $U_q$  e  $U_f$  são os módulos de cisalhamento do quartzo e do filme respectivamente.

- Ajuste da variável de referência geométrica, tooling fator (TF), para o valor de 100%. O TF é definido como um fator de correção onde é comparado as espessura do filme fornecidas pelo monitor de espessura ( $t_c$ ) e a espessura real do filme medida após a deposição ( $t_m$ ). Este fator pode ser expresso pela EQ 5.2.

$$TF\% = 100 \frac{t_m}{t_c} \quad \text{EQ. 5.2}$$

Após o ajuste dos parâmetros mencionados, foram realizadas deposições de filmes cuja espessura no monitor indicava ( $3000\text{\AA}$ ,  $2500\text{\AA}$ ,  $2000\text{\AA}$ ,  $1500\text{\AA}$ ,  $1000\text{\AA}$  e  $500\text{\AA}$ ). As espessuras foram medidas por perfilometria, para cada medida de espessura os ajustes de TF foram realizados até o valor de 100% .

Como dito anteriormente, a taxa de deposição é um dos parâmetros que interfere nas propriedades dos filmes, o controle deste parâmetro foi feito com o cristal de quartzo. Este parâmetro era modificado de acordo com a variação da corrente que passava no filamento.

A FIG mostra os parâmetros utilizados no cálculo da variação da espessura dos filmes.

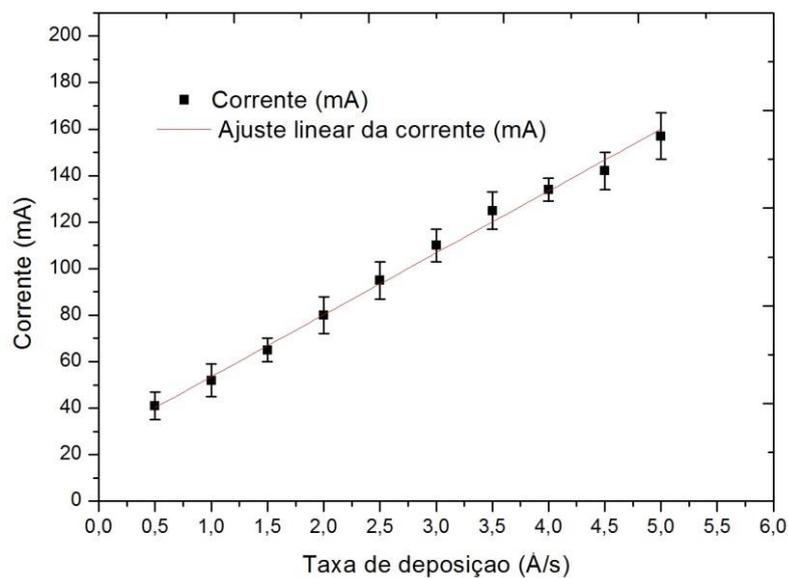


FIG. 5.1 Curva de calibração para estimativa da espessura

Deste modo, a taxa de deposição e a espessura indicada no display do sensor de quartzo foram os valores utilizados nas TAB 5.1 a 5.3.

TAB. 5.1 Espessuras para a taxa de 1Å/s

<b>ESPESSURA (Å)</b>	<b>TEMPO DE DEPOSIÇÃO (s)</b>
20	20
25	25
30	30
40	40
50	50
<b>75</b>	<b>75</b>

TAB. 5.2 Espessuras para a taxa de 3Å/s

<b>ESPESSURA (Å)</b>	<b>TEMPO DE DEPOSIÇÃO (s)</b>
20	6
25	8
30	10
40	13
50	17
<b>75</b>	<b>25</b>

TAB. 5.3 Espessuras para a taxa de 5Å/s

ESPESSURA (Å)	TEMPO DE DEPOSIÇÃO (s)
20	4
25	5
30	6
40	8
50	10
75	15

## 5.2 RESISTÊNCIA DE FOLHA

Para avaliar a variação da resistividade dos filmes depositados em função de suas espessuras, optou-se por utilizar os valores das resistências de folha ( $R_f$ ) em função da não confiabilidade dos valores das espessuras dos filmes depositados.

A resistência de folha,  $R_f$ , que tem como unidade Ohm/quadrado, está relacionada com a resistividade de acordo com a EQ. 5.3. Cabe ressaltar que, em função da geometria da amostra, o equipamento utilizado fornece automaticamente os valores da resistência de folha, não havendo necessidade do conhecimento da espessura dos filmes.

$$R_f = \frac{\rho}{t} \quad \text{EQ 5.3}$$

$R_f$  – Resistência de folha (Ohm/sq)

$\rho$  – Resistividade do filme (Ohm.cm)

t – Espessura (cm)

As FIG 5.2, 5.3 e 5.4 mostram a variação da resistência de folha dos filmes depositados em função de sua espessura.

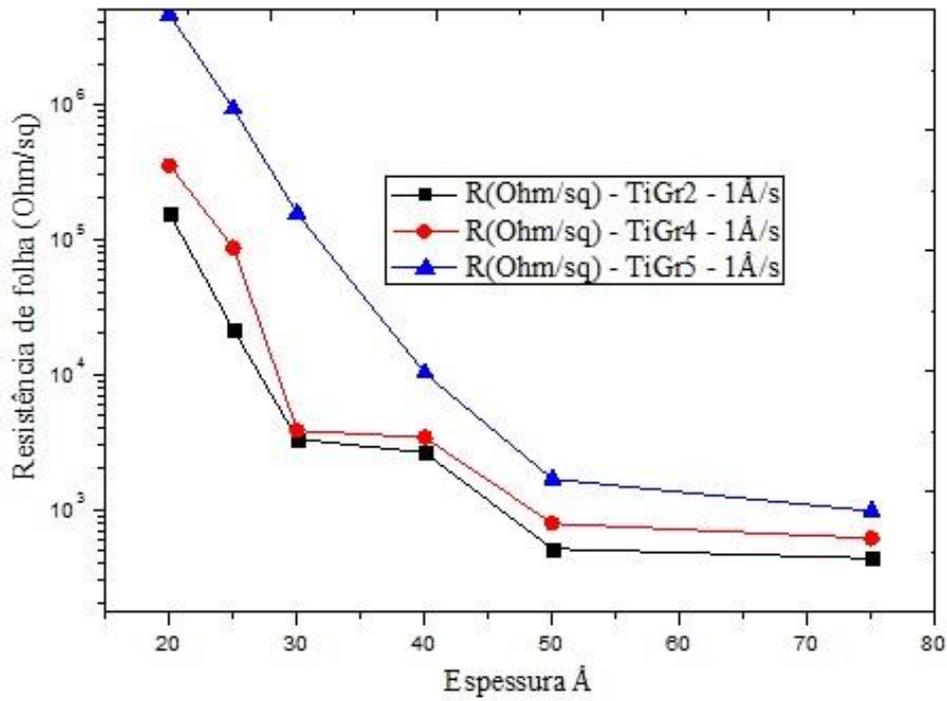


FIG. 5.2 Resistência de folha (Ohm/quadrado) dos filmes depositados em diferentes graus de pureza em função da espessura (Å) para a taxa de 1 Å/s

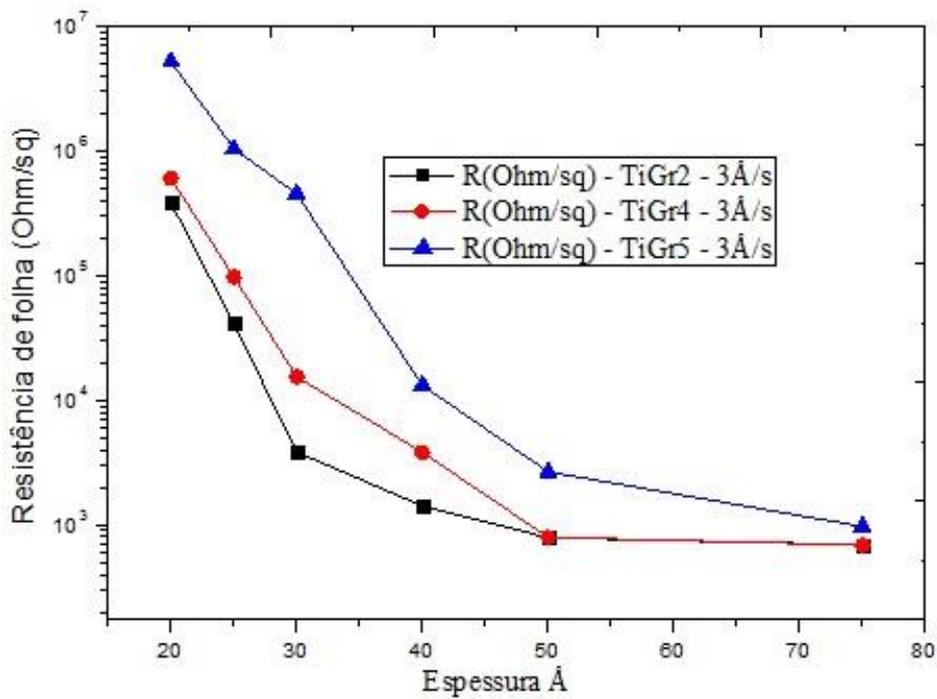


FIG. 5.3 Resistência de folha (Ohm/quadrado) dos filmes depositados em diferentes graus de pureza em função da espessura (Å) para a taxa de 3 Å/s.

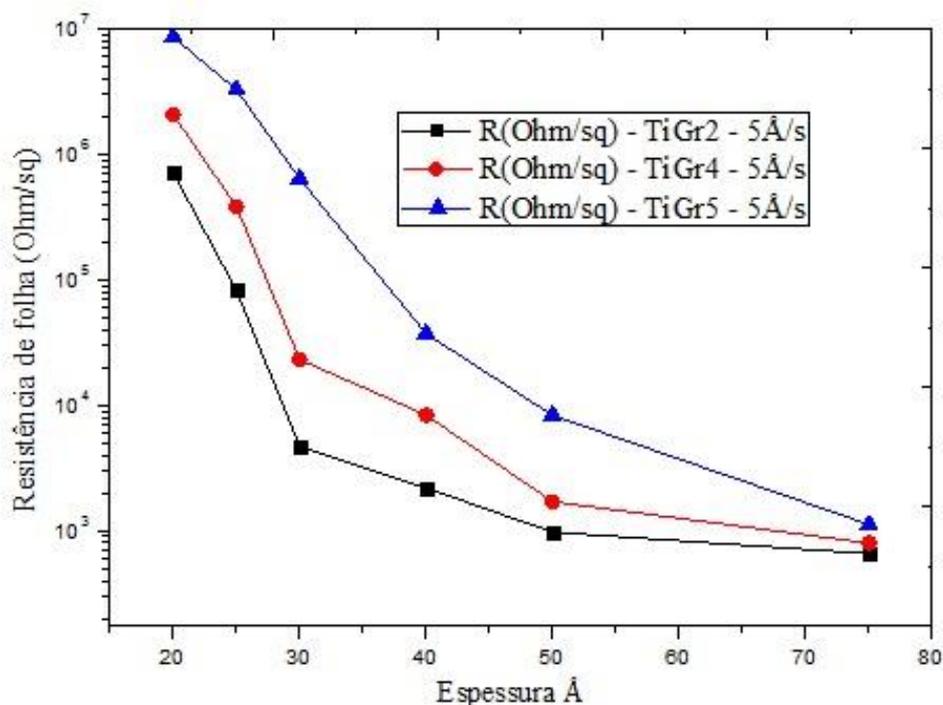


FIG. 5.4 Resistência de folha (Ohm/quadrado) dos filmes depositados em diferentes graus de pureza em função da espessura (Å) para a taxa de 5 Å/s

Ao analisar as FIG. 5.2 a 5.4 observa-se que as resistências de folha permanecem aproximadamente constantes para espessuras na faixa de 40 a 75 Å e aumentam para espessuras menores que 40 Å, independentemente da taxa de deposição utilizada e da pureza do material fonte. Este comportamento também foi observado por outros autores da literatura consultada [LIU, 2001; MECH 2011].

Os resultados obtidos nesta dissertação estão de acordo com o modelo proposto por vários pesquisadores para variação da resistividade de filmes finos metálicos ( $\rho$ ) em função de sua espessura ( $t$ ) [BHAT, 1998; LIM, 2006]. Em todos os trabalhos os pesquisadores compararam seus resultados com os modelos teóricos propostos por Fuchs–Sondheimer (modelo F–S), utilizado para espalhamento de elétrons na superfície do filme, e com o modelo de Mayadas–Shatzkes (modelo M–S) utilizado para espalhamento de elétrons nos contornos de grãos dos filmes.

Aproximações matemáticas foram realizadas por Lim et al [LIM, 2006] utilizando o modelo F-S, para ambos os casos: i) quando as espessuras dos filmes são muito maiores que o livre caminho médio dos elétrons ( $\lambda$ ), ou seja  $t/\lambda \gg 1$ , e ii) quando as espessuras dos filmes são muito menores que o livre caminho médio dos elétrons, ou seja,  $t/\lambda \ll 1$ .

A EQ 5.3 mostra a aproximação quando  $t/\lambda \gg 1$ .

$$\rho = \rho_0 \left[ 1 + \frac{3}{8} \frac{\lambda}{t} (1 - P) \right] \quad \text{EQ. 5.3}$$

onde  $\rho_0$  é a resistividade do material na forma volumétrica e P é o espalhamento de elétrons na superfície do filme.

A EQ 5.4 mostra a aproximação para filmes muito finos ( $t/\lambda \ll 1$ ).

$$\rho = \rho_0 \left[ \frac{4}{3} + \frac{1 - P}{1 + P} \frac{\lambda}{t} \frac{1}{\log\left(\frac{\lambda}{t}\right)} \right] \quad \text{EQ. 5.4}$$

Tem sido observado que para filmes finos policristalinos  $P \approx 0$  enquanto  $P \approx 1$  para materiais monocristalinos.

Nota-se que quanto menor for a espessura do filme fino depositado maior é a resistividade do filme quando comparada ao material na forma volumétrica.

Para avaliar a influência da taxa de deposição na variação da resistência de folha dos filmes são apresentadas as FIG. 5.5, 5.6 e 5.7 para os diversos graus de pureza utilizados.

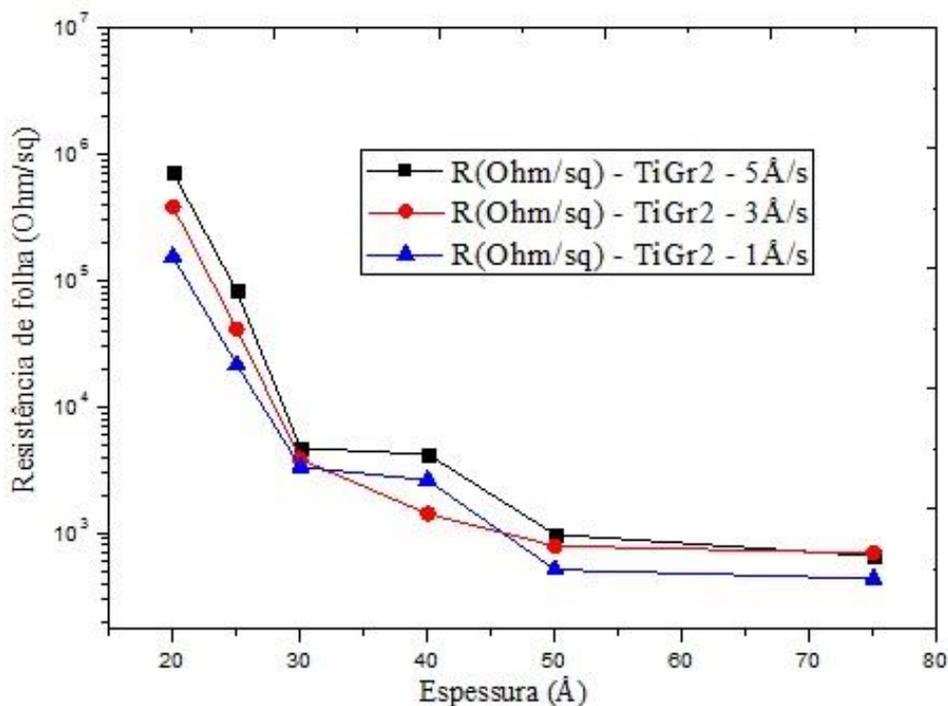


FIG. 5.5 Resistência de folha (Ohm/sq) dos filmes de TiGr2 depositados em diferentes taxas de deposição em função da espessura (Å)

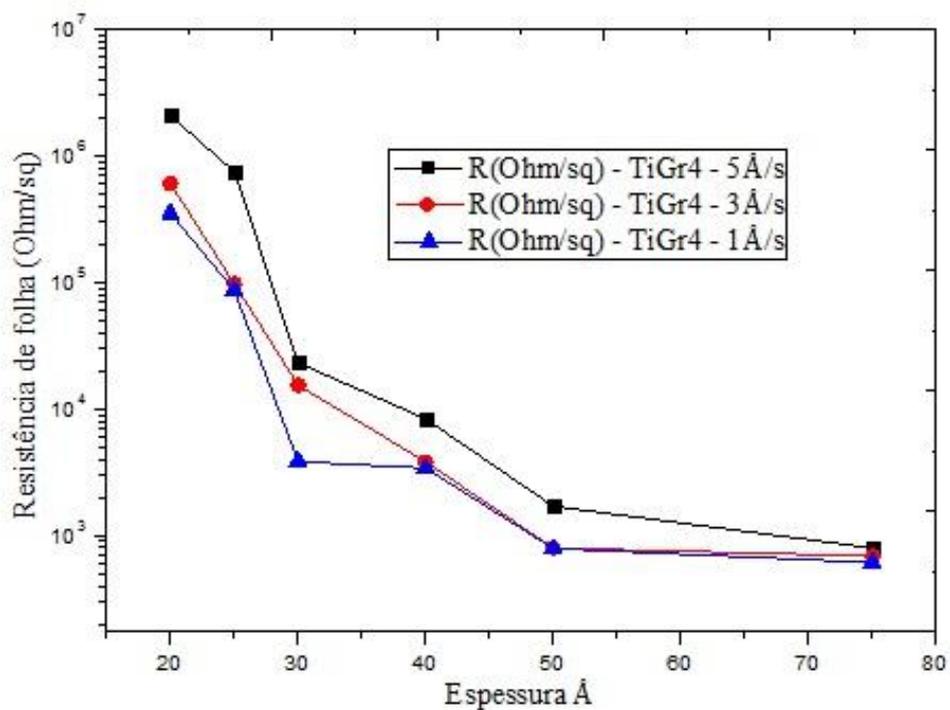


FIG. 5.6 Resistência de folha (Ohm/sq) dos filmes de TiGr4 depositados em diferentes taxas de deposição em função da espessura (Å).

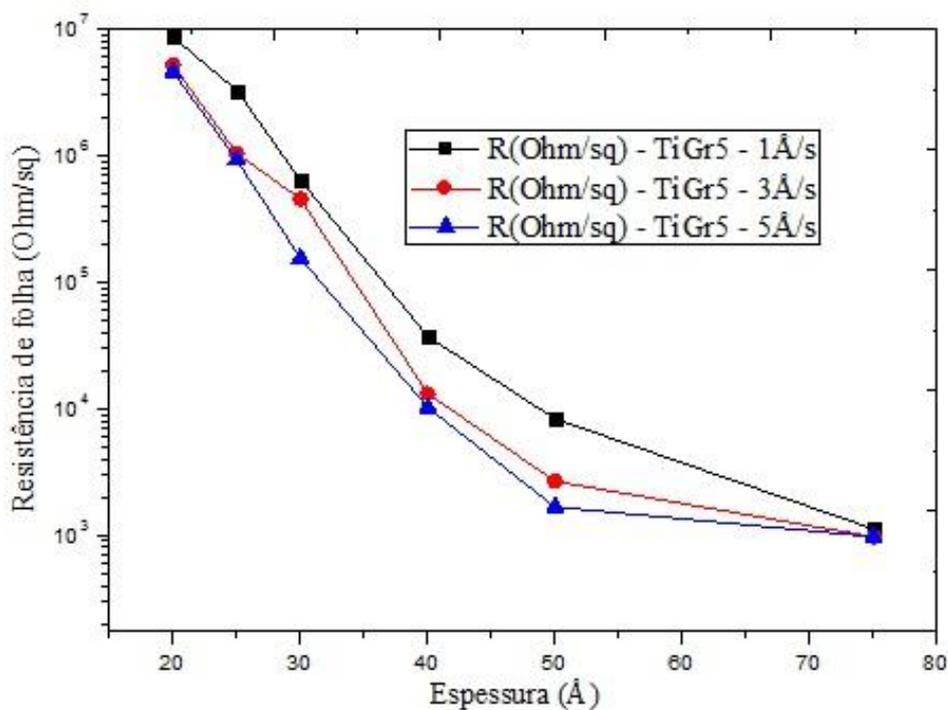


FIG. 5.7 Resistência de folha (Ohm/sq) dos filmes de TiGr5 depositados em diferentes taxas de deposição em função da espessura (Å).

Ao analisar as FIG. 5.5, 5.6, 5.7 verifica-se que filmes com espessuras menores que 40Å depositados com maiores taxas de deposições produziram filmes com maiores resistências de folha, para todos os grau de pureza do material utilizado. Entretanto, filmes com espessuras

maiores que 40Å tenderam a uma mesma resistência de folha, que de acordo com o formalismo mostrado na discussão anterior (EQ 5.3 e 5.4), é a resistência do material na forma volumétrica.

Para as taxas de deposição usadas, acredita-se que três processos distintos de crescimento dos filmes podem acontecer:

1. para filmes depositados com taxa de deposição de 1Å/s, passadas as etapas de nucleação, formação do núcleo crítico e coalescência, o crescimento acontece inteiramente por camadas em função da baixa taxa de chegada de átomos (modelo Frank–van der Merwe). Estes filmes possuem as menores resistências de folha [MARKOV, 1988];
2. para filmes depositados com taxa de deposição de 5Å/s, passadas as etapas de nucleação, formação do núcleo crítico e coalescência, o crescimento acontece preferencialmente por ilhas tridimensionais em função da alta taxa de chegada de átomos e, conseqüentemente, baixa mobilidade atômica (modelo Stranski–Krastanov). Conseqüentemente, estes filmes apresentam as maiores resistências de folha [BAKARAN, 2012];
3. para filmes depositados com taxa de deposição de 3Å/s, passadas as etapas de nucleação, formação do núcleo crítico e coalescência, o crescimento acontece por um misto de camadas e ilhas tridimensionais em função da média taxa de chegada de átomos e, conseqüentemente, uma intermediária mobilidade atômica (modelo Volmer–Weber). Estes filmes possuem resistências de folha com valores intermediários [FERREIRA 2006].

À medida que maiores espessuras são alcançadas, os filmes tendem a uma mesma morfologia não mais variando a resistência de folha.

As FIG. 5.8, 5.9 e 5.10 apresentam o percentual de absorção de micro-ondas para os filmes titânio depositados para as diferentes taxas de deposições utilizadas.

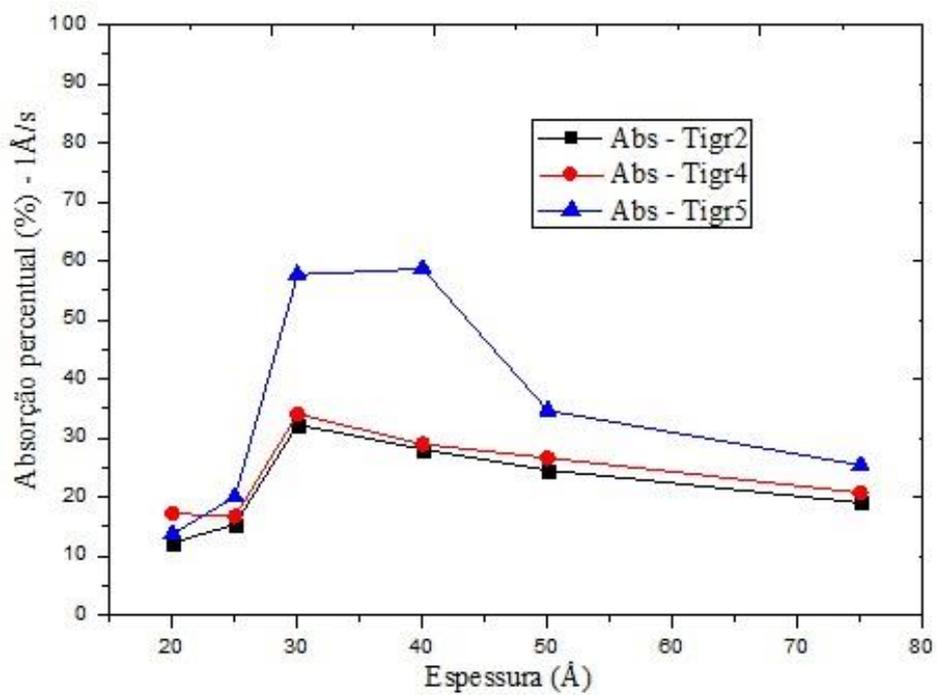


FIG. 5.8 Percentual de absorção de micro-ondas em 10 GHz em função da espessura, para os graus de pureza TiGr2, TiGr4 e TiGr5, depositados a uma taxa de 1Å/s.

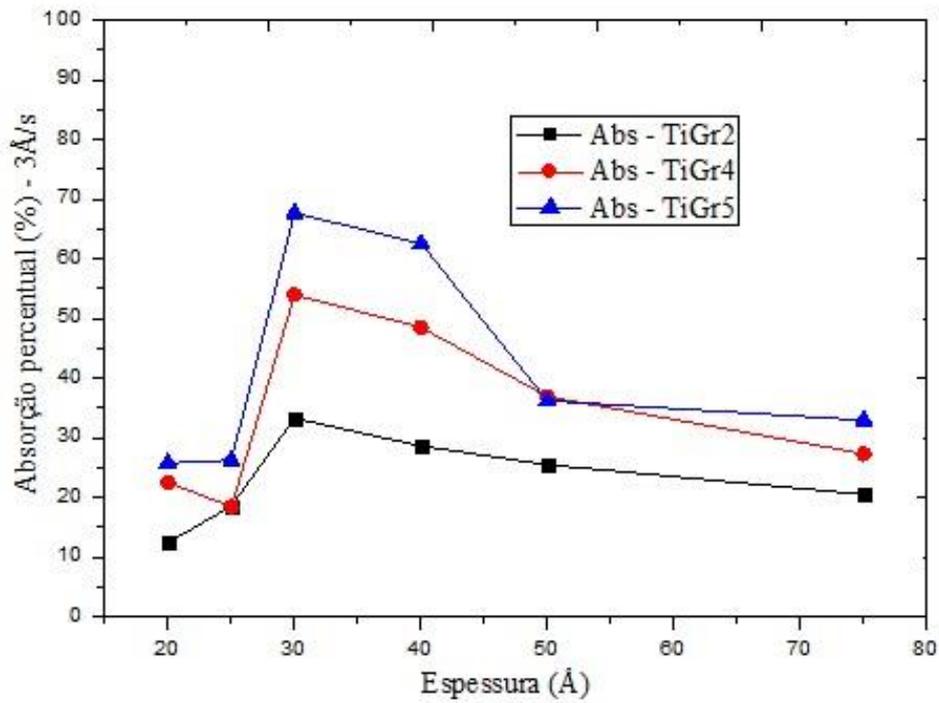


FIG. 5.9 Percentual de absorção de micro-ondas em 10GHz em função da espessura, para os graus de pureza TiGr2, TiGr4 e TiGr5, depositados a uma taxa de 3Å/s

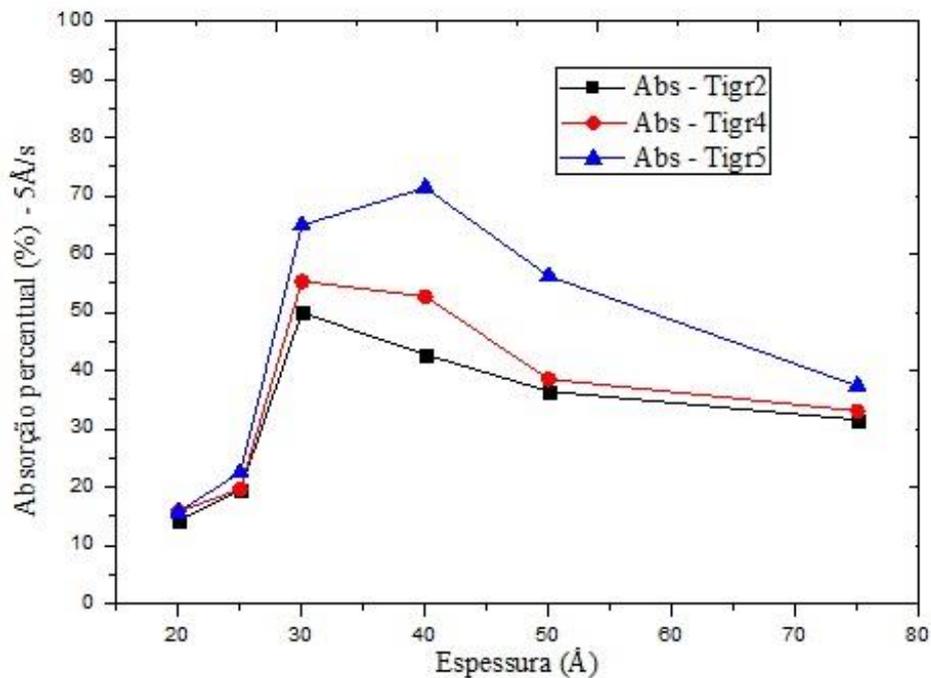


FIG. 5.10 Percentual de absorção de micro-ondas em 10 GHz em função da espessura, para os graus de pureza TiGr2, TiGr4 e TiGr5, depositados a uma taxa de 5Å/s.

Observa-se que a espessura, como esperado, é um importantíssimo fator na absorção de micro-ondas de filmes finos. Nota-se que o percentual de absorção é baixo para filmes de maiores espessuras, passa por um valor máximo e cai para zero para filmes extremamente finos.

Os maiores valores de absorção de micro-ondas são obtidos para filmes cujo material fonte é o mais impuro (TiGr5), independentemente da taxa de deposição utilizada. Este material também possibilitou a produção de filmes com as maiores resistências de folha, sendo que os depositados com taxa de 5Å/s foram os que apresentaram os maiores percentuais de absorção.

Portanto, fica evidenciada a relação direta entre a resistência elétrica dos filmes com o percentual de absorção de micro-ondas. A FIG. 5.11 apresenta a relação entre a resistência elétrica e o percentual de absorção. Embora, referências falem desta relação, os filmes com maiores resistências não apresentaram maiores percentuais de absorção.

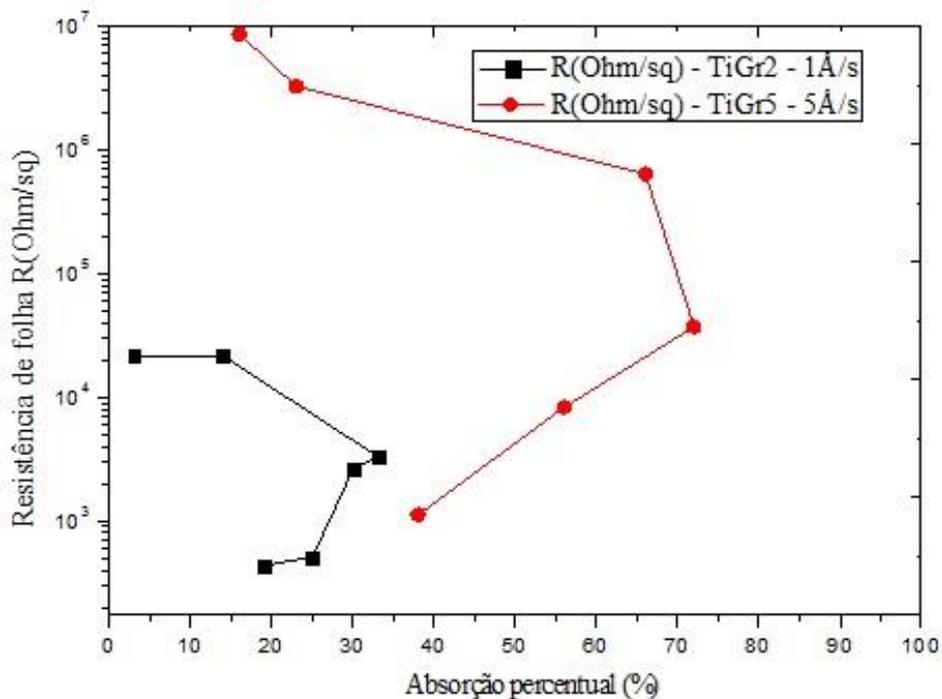


FIG. 5.11 Resistência de folha R(Ohm/sq) dos filmes de TiGr2 e TiGr5 depositados nas taxas de 1Å/s e 5Å/s respectivamente, em função da absorção percentual.

Em função da exposição realizada era de se esperar que os filmes com as maiores resistências elétricas propiciassem a obtenção dos maiores percentuais de absorção de micro-ondas, independentemente de sua espessura, mas isso não aconteceu. Embora, referências falem desta relação, os filmes com maiores resistências não apresentaram maiores percentuais de absorção, evidenciado na FIG 5.11.

Imagina-se que abaixo de determinado valor de espessura os filmes passam ter um crescimento descontínuo apresentando uma alta resistência elétrica. Desta forma, apesar da alta resistência elétrica, ele seria “transparente” à radiação eletromagnética na faixa de micro-ondas. Esta descontinuidade não deveria interferir na absorção de micro-ondas em função das

dimensões envolvidas: pequena dimensão de vazios nos filmes e grande comprimentos de ondas da radiação.

Nas FIG. 5.12, 5.13 e 5.14 são apresentados os resultados de absorção de micro-ondas agrupadas por graus de purezas do material fonte.

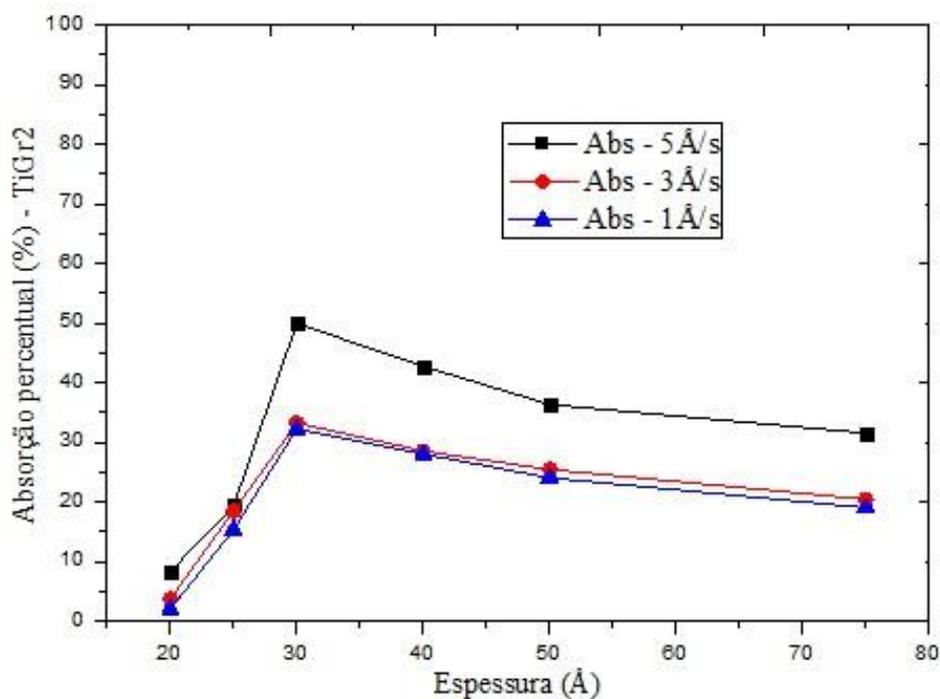


FIG. 5.12 Percentual de absorção do TiGr2 em 10 GHz, depositados nas taxas de 1Å/s, 3Å/s e 5Å/s, em função da espessura (Å).

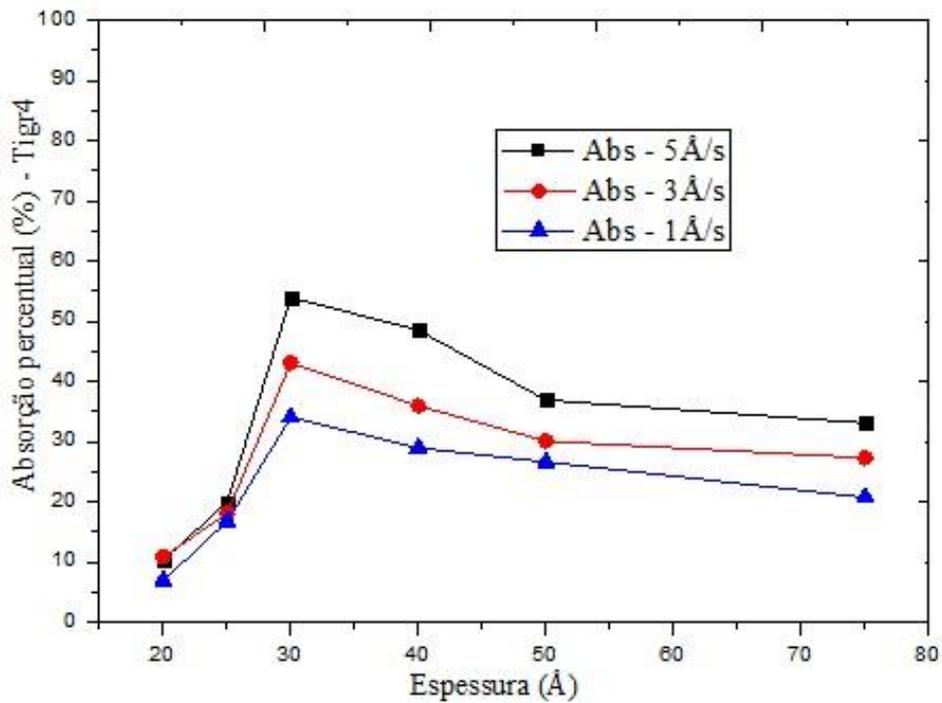


FIG. 5.13 Percentual de absorção do TiGr4 em 10 GHz, depositados nas taxas de 1Å/s, 3Å/s e 5Å/s, em função da espessura (Å).

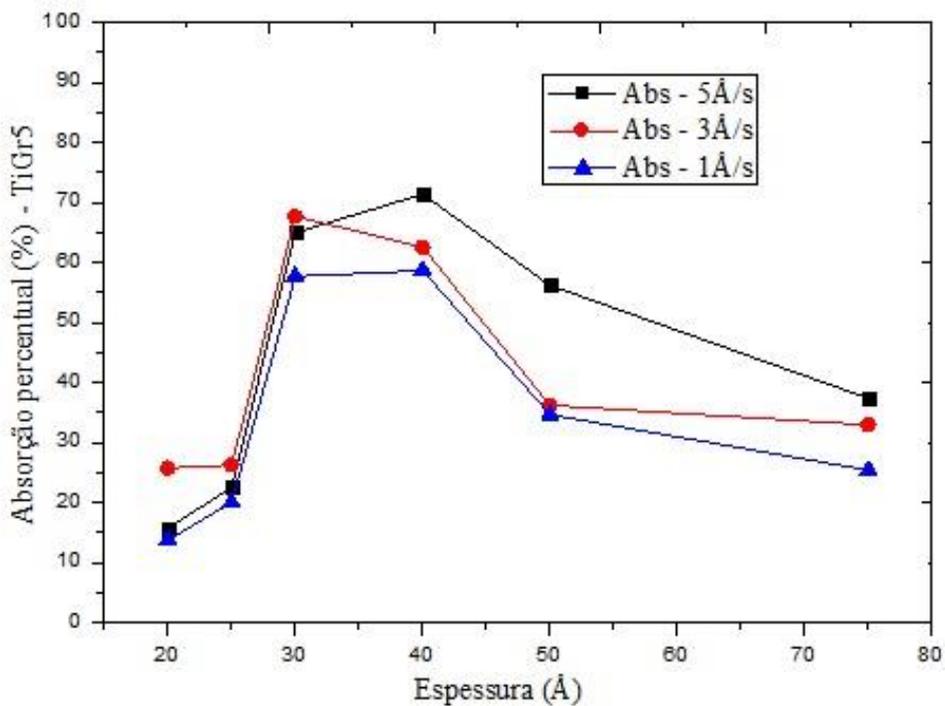


FIG. 5.14 Percentual de absorção do TiGr5 em 10 GHz, depositados nas taxas de 1Å/s, 3Å/s e 5Å/s, em função da espessura (Å).

As FIG. 5.8, 5.9 e 5.10 apresentam um comportamento análogo às FIG. 5.12, 5.13 e 5.14, onde observa-se um máximo percentual de absorção entre 30Å e 35Å de espessura. As

FIG 5.15, 5.16 e 5.17 apresentam o comportamento dos filmes de TiGr5 depositados nas taxa de  $1\text{\AA}/\text{s}$ ,  $3\text{\AA}/\text{s}$  e  $5\text{\AA}/\text{s}$ , observando os percentuais de absorção para a faixa de frequência de 8 a 12 GHz.

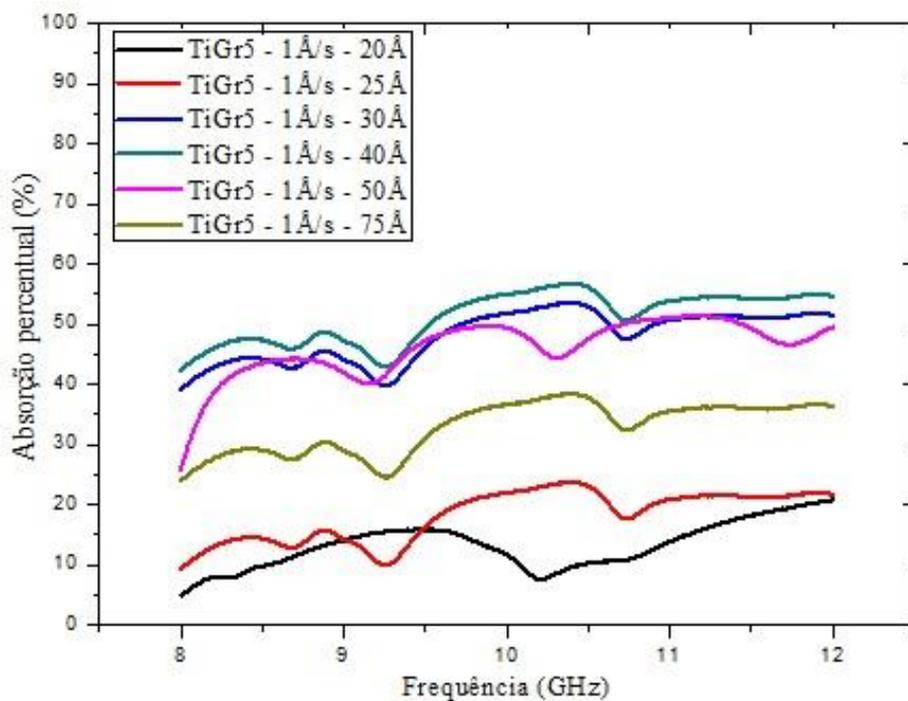


FIG. 5.15 Percentual de absorção dos filmes de TiGr5 depositados na taxa de  $1\text{\AA}/\text{s}$  em função da faixa de frequência de 8 a 12 GHz.

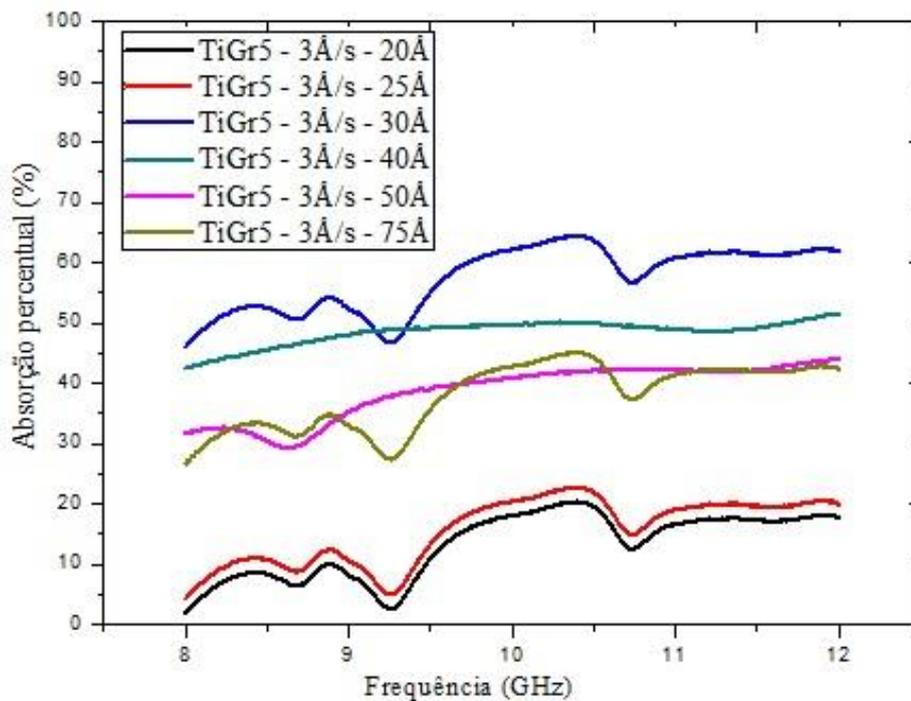


FIG. 5.16 Percentual de absorção dos filmes de TiGr5 depositados na taxa de  $3\text{\AA}/\text{s}$  em função da faixa de frequência de 8 a 12 GHz.

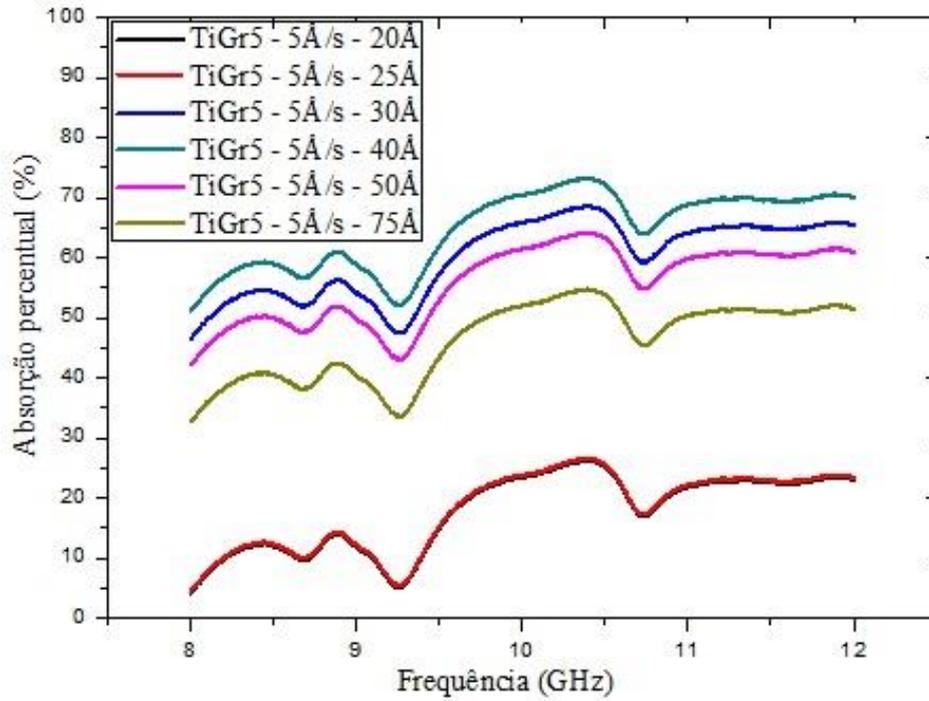


FIG. 5.17 Percentual de absorção dos filmes de TiGr5 depositados na taxa de 5Å/s em função da faixa de frequência de 8 a 12 GHz.

As FIG. 5.15, 5.16 e 5.17 apresentam um comportamento semelhante onde espessuras próximas a 20 e 25Å mostram baixa absorção percentual quando comparadas à espessuras próximas a 30 e 40Å, que apresentam os maiores percentuais de absorção na faixa de frequência de 8 a 12 GHz. Sendo assim, nota-se a importância na relação entre a espessura e absorção de micro-ondas, quanto menor a espessura maior o percentual de absorção. Salvo que, esta relação é influenciada pela resistência elétrica, como apresentado na FIG. 5.11. Comparando os resultados com as referências citadas [SILVA, 2012], observa-se um comportamento similar na relação entre a espessura e absorção percentual.

#### 5.4 MICROSCOPIA

O objetivo da análise por microscopia eletrônica de varredura era observar a continuidade dos filmes produzidos.

Após a análise das imagens obtidas não foi possível ter certeza se os filmes eram contínuos. Em razão desta incerteza, estão apresentados nos resultados apenas as imagens de MEV do filme de TiGr5 depositado a uma taxa de  $5\text{\AA}/\text{s}$  na espessura de  $30\text{\AA}$ , como mostram as FIG 5.18 e 5.19.

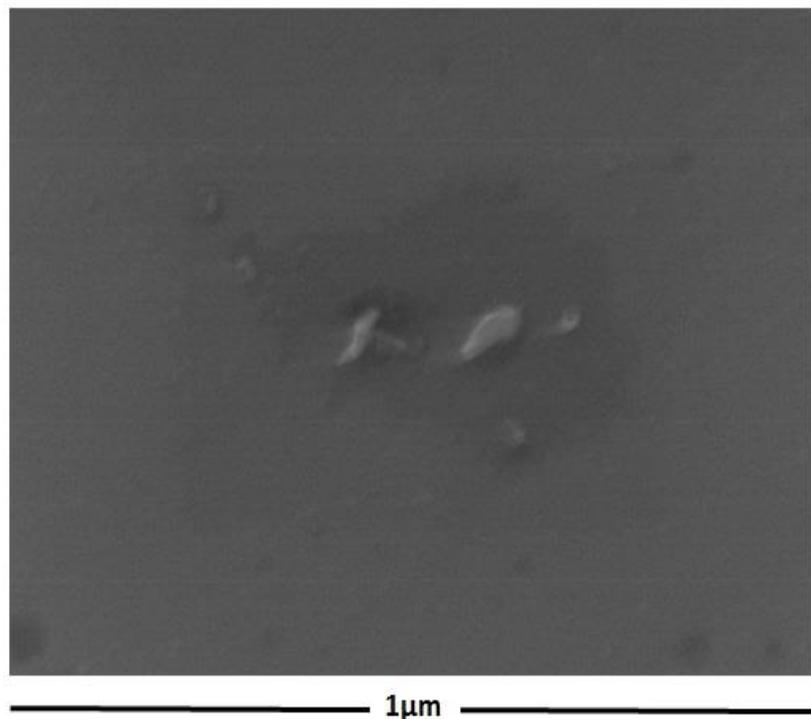


FIG. 5.18 Microscopia Eletrônica de Varredura do TiGr5 depositado a uma taxa de  $5\text{\AA}/\text{s}$  na espessura de  $30\text{\AA}$

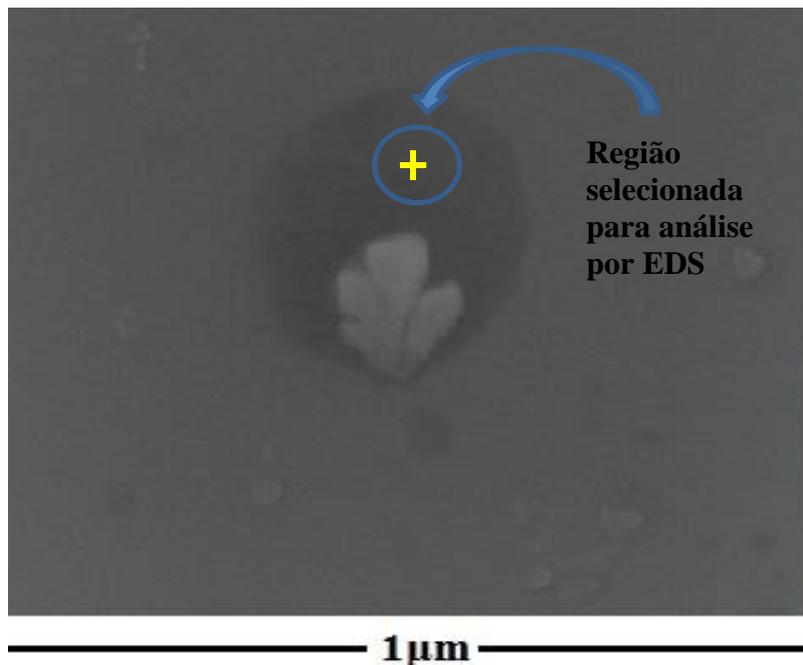


FIG. 5.19 Microscopia Eletrônica de Varredura do TiGr5 depositado a uma taxa de  $5\text{\AA}/\text{s}$  na espessura de  $30\text{\AA}$

Foram observados nas FIG. 5.18 e 5.19 contrastes que pareciam ser discontinuidades nos filmes, mas as análises por espectroscopia de energia dispersiva de raios x (EDS) revelaram a presença de titânio nestes locais, FIG. 5.20.

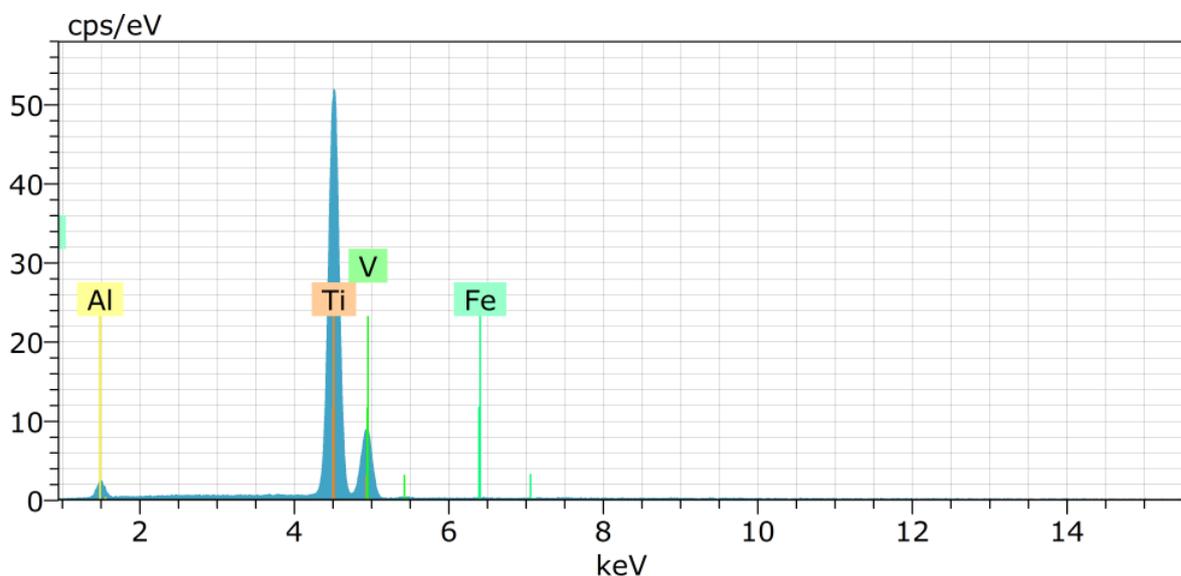


FIG. 5.20 Espectro de EDS do filme de TiGr5 depositado a uma taxa de  $5\text{\AA}/\text{s}$  na espessura de  $30\text{\AA}$ .

Portanto, estima-se que em algumas regiões dos filmes a espessura dos mesmos sejam extremamente finas, mas contínuas, não possuindo material em quantidade suficiente para dissipar a radiação.

## 5.5 TRANSMITÂNCIA ÓPTICA

Da FIG. 5.21 a 5.29, é possível observar o comportamento do percentual de transmitância na faixa de 200 a 800nm dos filmes depositados.

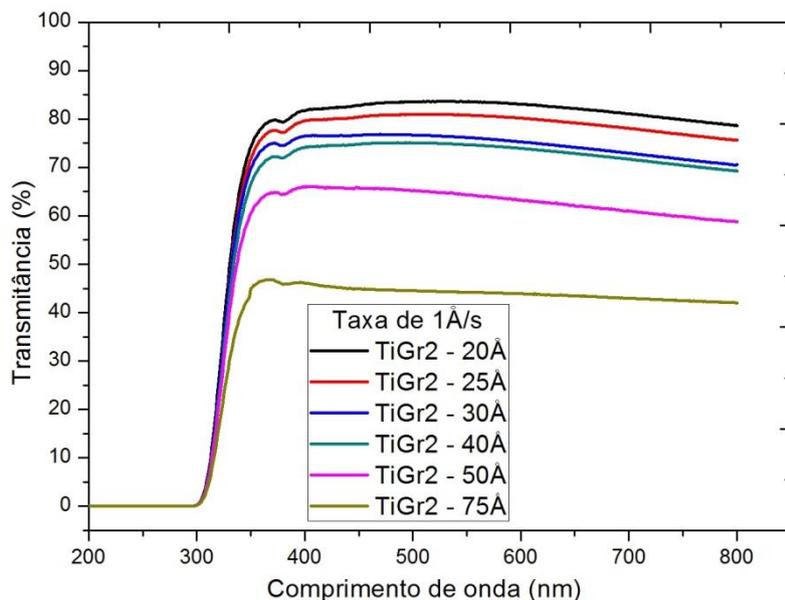


FIG. 5.21 Percentual de Transmitância TiGr2 para taxa de 1 Å/s na faixa de 200 a 800nm

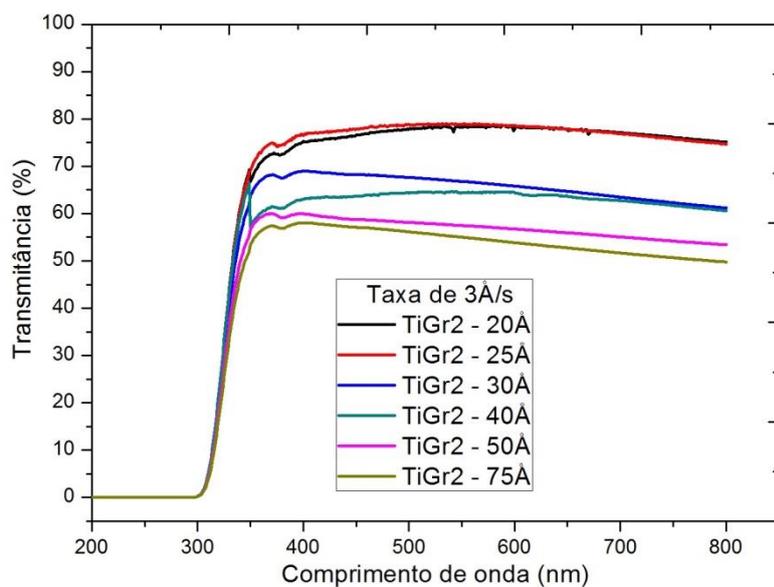


FIG. 5.22 Percentual de Transmitância TiGr2 para taxa de 3 Å/s na faixa de 200 a 800nm

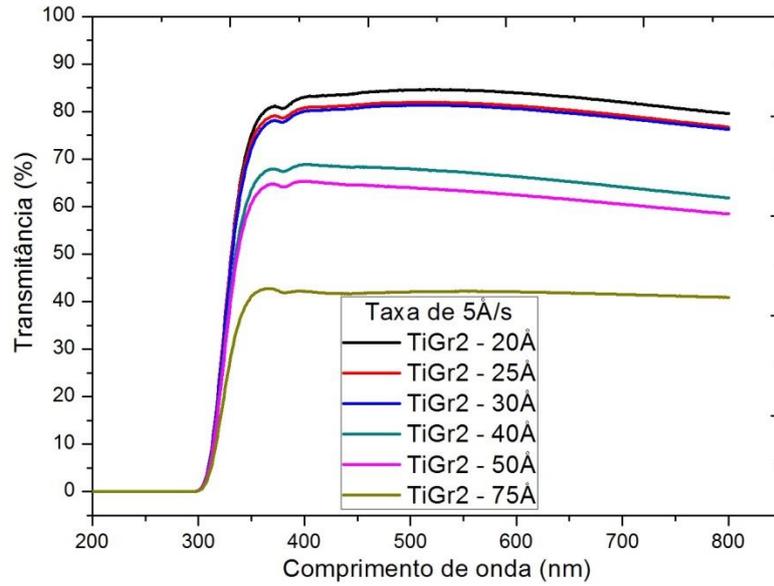


FIG. 5.23 Percentual de Transmitância TiGr2 para taxa de 5Å/s na faixa de 200 a 800nm

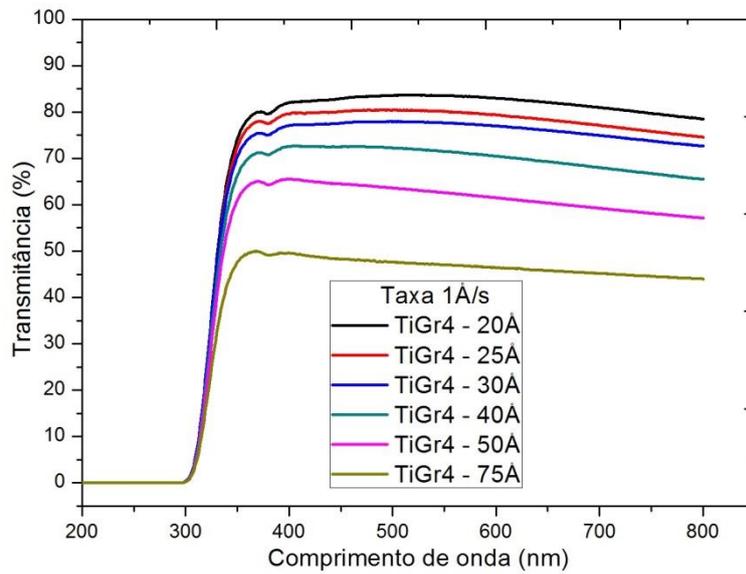


FIG. 5.24 Percentual de Transmitância TiGr4 para taxa de 1Å/s na faixa de 200 a 800nm

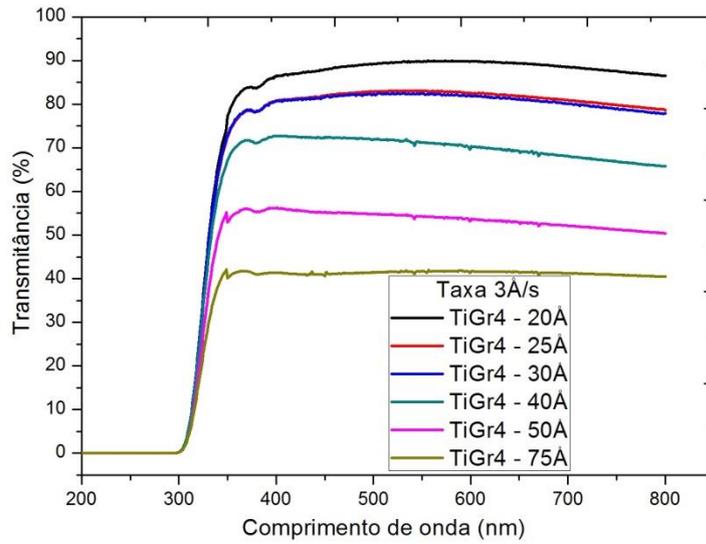


FIG. 5.25 Percentual de Transmitância TiGr4 para taxa de 3Å/s na faixa de 200 a 800nm

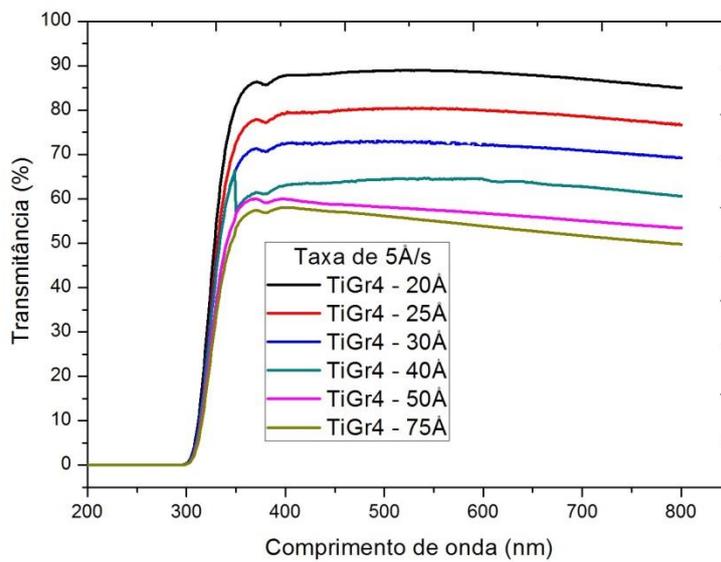


FIG. 5.26 Percentual de Transmitância TiGr4 para taxa de 5Å/s na faixa de 200 a 800nm

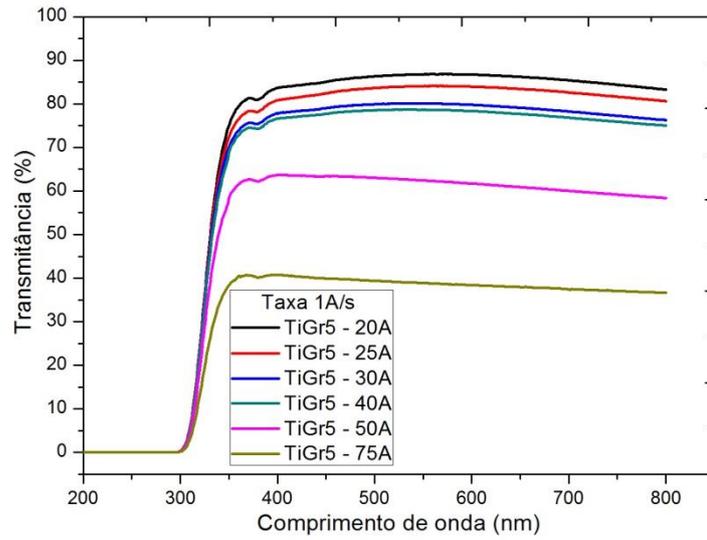


FIG. 5.27 Percentual de Transmitância TiGr5 para taxa de 1Å/s na faixa de 200 a 800nm

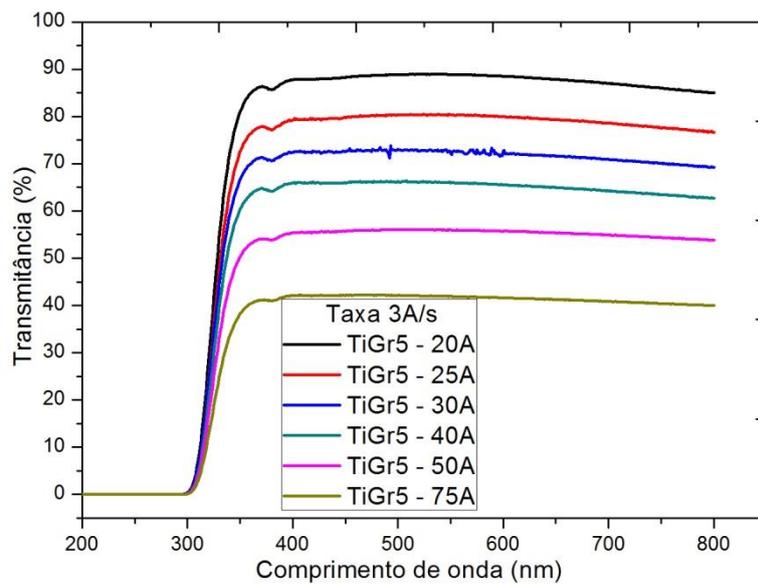


FIG. 5.28 Percentual de Transmitância TiGr5 para taxa de 3Å/s na faixa de 200 a 800nm

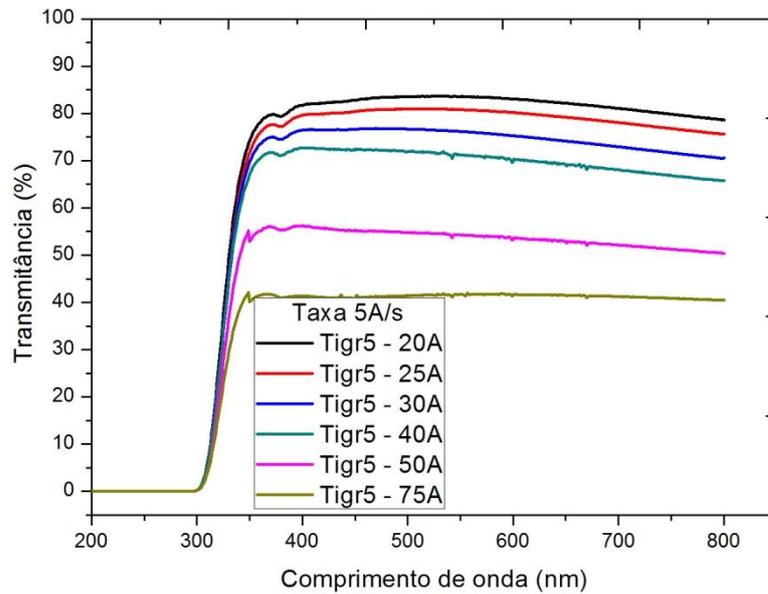


FIG. 5.29 Percentual de Transmitância TiGr5 para taxa de 5Å/s na faixa de 200 a 800nm

Em função da aplicação pretendida na faixa do espectro visível, os resultados de transmitância, das FIG 5.21 a 5.29, expressam que os filmes ultrafinos produzidos atendem as necessidades quanto à transparência onde o máximo de absorção de micro-ondas acontece, ou seja, filmes com espessura da ordem de 30Å. É possível observar um comportamento análogo em todas as figuras de transmitância. Nota-se que para comprimento de onda abaixo 350nm há um decaimento abrupto no percentual de absorção. Isto ocorre porque o vidro absorve a radiação para comprimentos de ondas abaixo de 350nm.

## 6. CONCLUSÃO

A partir do processo de deposição por feixe elétrons, foram produzidos filmes finos de titânio para aplicações como absorvedores de radiação eletromagnética na faixa de 8 a 12GHz. Foi avaliada a influência do tipo de material fonte, a taxa de deposição, a espessura e a resistência de folha nos filmes finos produzidos na absorção de micro-ondas. Em função dos resultados, chegou-se as seguintes conclusões:

- os filmes ultrafinos de titânio produzidos neste trabalho de dissertação podem ser utilizados como absorvedores de micro-ondas;
- a espessura do filme tem influência direta nas propriedades ópticas dos filmes produzidos. Filmes com espessuras na faixa de 30Å são ótimos absorvedores de micro-ondas e possuem transparência na faixa visível do espectro eletromagnético;
- estima-se que a introdução de defeitos nos filmes, consequência da pureza do material utilizado, taxa de deposição e espessura, são os responsáveis pelas propriedades elétricas dos filmes produzidos. Os defeitos atuam como centros espalhadores de elétrons diminuindo a sua mobilidade e, conseqüentemente, aumentando sua resistividade;
- o material mais impuro utilizado, TiGr5, depositado com a maior taxa de deposição, 5Å/s, com espessuras na faixa de 30Å propiciou a produção de filmes com o maior percentual de absorção de micro-ondas. A transmitância óptica em 550nm foi da ordem de 70,2%.
- estima-se que quanto mais impuro for o material fonte utilizado, maior será a concentração de defeitos introduzida nos filmes finos produzidos;

## 7. SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

Os resultados alcançados no presente trabalho reforçaram a existência de uma relação direta da absorção de micro-ondas com a resistividade dos filmes produzidos. Porém, é necessário o aprofundamento no estudo de materiais metálicos utilizados como absorvedores de micro-ondas. Portanto, sugere-se a realização dos seguintes trabalhos:

- Depositar filmes com TiGr5 para taxas de deposição maiores que  $5\text{\AA}/\text{s}$ ;
- Realizar observações por Microscopia Eletrônica de Transmissão para certificar a continuidade dos filmes produzidos com espessuras menores que  $30\text{\AA}$ ;
- Avaliar a absorção de micro-ondas com incidência da Radiação Eletromagnética pela superfície de vidro;
- Estudar os mecanismos físicos envolvidos na absorção de micro-ondas.

## 8. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ASAS DE FERRO. Gotha Go 229..

Disponível em <http://asasdeferro.blogspot.com.br/2015/07/horten-ho-229.html>

[acesso em 02 de Setembro de 2016b]

ASTM International. All Rights Reserved. Titanium: A Technical Guide, 2nd Edition (#06112G), 2000.

AXELEVITCH. A, GORENSTEIN. B, GOLAN. G., **Investigation of Optical Transmission in Thin Metal Films**. 18th International Vacuum Congress (IVC-18) Physics Procedia V. 32, pg 1 – 13, 2012

BASKARAN A., SMEREKA. P. **Mechanisms of Stranski-Krastanov growth**. Journal Of Applied Physics 111, 27 de fevereiro de 2012

BHAT, K.S.; DATTA, S.K.; SURESH, C. **Electrical and Microwave Characterization of Kanthal Thin Film: Temperature and Size Effect**. Thin Solid Films. Nr 332, pg 220-224. 1998.

CHENG, D.K., **Field and Wave Eletromagnetics**; 2ªEd. 1992.

DANTAS, C. C.; GAMA, A. M.; REZENDE, M. C. **Dependence of microwave absorption properties on ferrite volume fraction in MnZn ferrite/rubber radar absorbing materials**. Journal of Magnetism and Magnetic Materials 323 (2011); Jun. 2011.

EDMINISTER, J. A. **Eletromagnetismo**. McGraw-Hill Education 4 Ed. 2014

FERREIRA. S. O., FERREIRA Jr. S. C. Volmer-Weber growth of CdTe on silicon: A one-dimension Monte Carlo Model. Brazilian Journal of Physics, vol. 36 2A, junho de 2006.

- HONG, Y. K.; LEE, C. Y.; JEONG, C. K.; LEE, D. E.; KIM, K.; JOO, J. **Method and Apparatus to Measure Electromagnetic Interference Shielding Efficiency and its Shielding Characteristics in Broadband frequency Ranges**. Review of Scientific Instruments. Vol 74. Nr 2. pg 1098-1102. 2003.
- HOULDEN, Michael A., CHATTERTON, Paul A –**EMC: Electromagnetic Theory to Practical Design**. John Wiley & Sons Ltd.. England.1996.
- HWANG, LihTyng. - **A Review of the Skin Effect as Applied to Thin Film Interconnections**. Ieee transaction on c omponents, hybrids, and manufacturing technology, Vol 15, n°1, February 1992.
- KASAP.Safa., COPPER., Peter., **Handbook of Electronic and Photonic Materials**. Springer Science Bussines Midia. Ed. 2007
- KAISER, K. L., **Electromagnetic Compatibility Handbook**, CRC Press, 2004.
- KNOTT, Eugene. F., SCHAEFFER, J. F., TULEY, M. T. - **Radar cross section** (2nd ed.), Artech House, Norwood, USA (1993).
- KNOTT, Eugene. F. – **Radar Cross Section Measurement**. Van Nostrand Reinhold Softcover reprint of the hardcover, 1.ed 1993.
- KRAUS, John D. **Electromagnetics**. McGraw-Hill. 4<sup>a</sup> Ed. New York. 1991.
- LIM. J. W, ISSHIKI. M. – **Electrical resistivity of Cu films deposited by ion beam deposition: Effects of grain size, impurities, and morphological defect**. Journal of Applied Physics Volume 99. Recebido 01 Outubro 2005, aceito 28 Fevereiro 2006, publicado 15 Maio 2006
- LIU, H. D., ZHAO, Y. P., RAMANATH, G., MURARKA, S.P., WANG, G. C. – **Thickness dependent electrical resistivity of ultrathin (>40 nm) Cu films**.Thin Solid Films vol 384, pg 151 – 156 2001.

- LOUDJANI M. K., STELLA C. **Relation between Microstructure and Electric Resistivity of Copper, Nickel, NiCu<sub>1-x</sub> Alloys and Ni/Cu Bilayered Thin Films.** International Journal of Thin Films Science and Technology, vol 4, No. 2, pg 75-82 2015
- MAHAFZA, Bassem R. - **Radar systems& analysis and design using Matlab.** CHAPMAN & HALL/CRC Boca Raton London New York Washington, 2000.
- MARKOV. I, MILCHEV A. **Theory of epitaxy in a Frank-Van Der Merwe model with anharmonic interactions.** Thin Solid Films - Volume 126, 2.ed 12 abril 1985 pg 83-93
- MECH.K, KOWALIK.R, ZABINSKI.P,. **Cu Thin films deposited by dc magnetron sputtering for contact surfaces on electronic components.** Archives Of Metallurgy and Materials. Vol 56, pg 903-908, 2011.
- MARTIN, Inácio Malmonge., MIACCI, Marcelo Alexandre Souza., NOHARA, Evandro Luís., REZENDE, Mirabel Cerqueira.- **Medidas de Refletividade de Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética Usando as Técnicas RCS e NRL.** Revista de Física Aplicada e Instrumentação, vol. 16, no. 1, Março, 2003.
- MATHAD, Shridhar N., JADHAV, Roopali N., PURI, Vijaya. – **Microwave Studies of Bismuth Strontium Manganite Thick-Filmsby Superstate Method.** Open Journal of Modern Physics V.1, N. 2, Junho 2014.
- MATTOX, Donald M. -**Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing: Film Formation, Adhesion, Surface Preparation and Contamination Control.** Society of Vacuum Coaters Albuquerque, New Mexico.NoyesPublications, 1998.
- MIGLIANA, A.C.C. et al. - **Características de Absorção da Radiação Eletromagnética em Revestimentos Planos à Base de Ferritas de Mg-Mn.** Revista Científica Periódica – Telecomunicações Volume 5, número 2 Dezembro de 2002.\*
- NAVAL TECHNOLOGY. M80 Stilleto

Disponível em <http://www.naval-technology.com/projects/m80-stiletto/> [acesso em: 02 de Setembro de 2016].

NEELAKANTA, P. S. **Handbook of Eletromagnetic Materials – Monolithic and Composite Versions and Their Applications**, Publishers 1995.

NIE, Y., HE,H.H., GONG,R.Z., ZHANG,X.C., **The electromagnetic characteristics and design of mechanically alloyed Fe-Co particles for electromagnetic wave absorber**, Journal of Magnetism an magnetic materials, v.310, pg.13-16, 2007.

NIUSSENZVEIG, Herch Moyses. - **Curso de Física Básica 3: Eletromagnetismo**, Editora Edgard Blücher, 1997.

OTT, Henry W. - **Noise Reduction Techniques in Electronic Systems**. John Wiley e Sons, Inc., 1988.

PANTA G. P, SUBEDI D. P. **Eletrical Characterization of Aluminum (Al) Thin Filmes Measured by Using Four-point Probe Method**. KATHMANDU UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE, ENGINEERING AND TECHNOLOGY VOL. 8, No. II, pg 31-36, DEZEMBRO, 2012.

PARK, J.S., TANIGUCHI, S. AND PARK, Y.J. **Maximum joule heat by tubular susceptor with critical thickness on induction heating**. J.Phys. D: Appl. Phys. 42, 2009, p. 045509.

PAULA, Adriano Luiz de.,GAMA, Adriana Medeiros., REZENDE, Mirabel Cerqueira. **A utilização da simulação computacional para a predição de comportamento de MARE magnéticos**. X Simpósio de aplicações operacional aéreas de defesa. ITA são José do Campos, SP. 24-26 de setembro de 2008.

PINTO, Simone S., REZENDE, Mirabel Cerqueira. **Estudo da Aplicação da Poli(O-Metoxianilina) e de seus Compósitos com Negro de Fumo no Processamento de Absorvedores de Micro-Ondas**. Polímeros vol.22 no.4 São Carlos 2012 Epub Aug 14, 2012

ROBERT, Rêne. - **Efeito Pelicular**. Revista brasileira de ensino de física, v.22, n.2, p. 285-289, jun. 2000.

SHEFFIELD, Richard. The Official F-19 Stealth Fighter Handbook. USA. 1989.

SESHAN, Krishna. – **Handbook of Thin-Film Deposition Processes and Techniques: princípios, métodos, equipamentos e aplicações**. 2nd edition 2002.

SILVA, Cirene de Andrade Prata da. – Produção de filmes finos de kanthal absorvedores de micro-ondas. Dissertação de Mestrado, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro 2014.

SILVA, Samuel Machado Leal., FERREIRA, Carlos Luiz. – **Thin Films Of Kanthal And Aluminum For Electromagnetic Wave Absorption**. Journal of Nanoresearch (JRN), Vol 14, Pg 145, 2011.

SISTEMA DE ARMAS

Disponível em: <http://sistemasdearmas.com.br/ge/furt14aerconv1.html> [acesso em: 16 de Janeiro de 2016]

SOETHE, Viviane Lilian., NOHARA. Evandro Luiz., REZENDE, Mirabel Cerqueira. FONTANA, Luis César **Radar absorbing materials based on titanium thin film obtained by sputtering technique**. JATM Vol.3, No.3, pp. 279-286, Sep. - Dec., 2011

SOETHE, Viviane Lilian., NOHARA. Evandro Luiz., REZENDE, Mirabel Cerqueira. FONTANA, Luis César. - **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, p. 63-67, 2008.

SR-71. Lockheed SR-71 Blackbird.

Disponível em <http://www.sr-71.org/blackbird/> [acesso em: 02 de Setembro de 2016].

SUN, Ding; McGINNIS, David. **Measurement and Simulation Result of Ti Coated Microwave Absorber**. Proceedings of the Particle Accelerator Conference. New York.1999.

VRIES de, J. W. C., **Thin Solid Film**, v 167, p25, 1988

WALLACE, John. L. - "**Broadband Magnetic Microwave Absorbers: Fundamental Limitations**", IEEE Transactions on Magnetic, vol. 29, NO. 6, pp 4209-4214, November 1993.

WHITE, Joseph F. - **High frequency techniques : an introduction to RF and microwave engineering**. A John Wiley& Sons, Inc. publication, IEEE 2004.