



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS DE  
COMUNICAÇÃO E AUTOMAÇÃO**

**DIÊGO PIRES GURGEL**

**ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE MATERIAL  
ABSORVEDOR DE MICRO-ONDAS BASEADO EM  $\text{Nb}_2\text{O}_5$   
COM  $\text{Mo}$  VIA METALURGIA DO PÓ**

**MOSSORÓ – RN**

**2016**

**DIÊGO PIRES GURGEL**

**ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE MATERIAL  
ABSORVEDOR DE MICRO-ONDAS BASEADO EM Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>  
COM Mo VIA METALURGIA DO PÓ**

Dissertação de mestrado acadêmico apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Comunicação e Automação, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Sistemas de Comunicação e Automação.

Orientador: Prof. Dr. Idalmir de Souza Queiroz  
Júnior – UFERSA

Co-orientador: Prof. Dr. Manoel Quirino da Silva  
Junior – UFERSA

**MOSSORÓ – RN**

**2016**

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei n° 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei n° 9.610/1998. O conteúdo desta obra tornar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

P667e Pires Gurgel, Diêgo.

Estudo e desenvolvimento de material absorvedor de micro-ondas baseado em Nb2O5 com Mo via metalurgia do pó / Diêgo Pires Gurgel. - 2016.  
113 f. : il.

Orientador: Idalmir de Souza Queiroz Júnior .  
Coorientador: Manoel Quirino da Silva Junior.  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em Sistemas de Comunicação e Automação, 2016.

1. MARE. 2. Nb2O5 dopado com Mo. 3. Sinterização por micro-ondas. I. de Souza Queiroz Júnior , Idalmir, orient. II. Quirino da Silva Junior, Manoel, co-orient. III. Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

**DIÊGO PIRES GURGEL**

**ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE MATERIAL  
ABSORVEDOR DE MICRO-ONDAS BASEADO EM Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>  
COM Mo VIA METALURGIA DO PÓ**

Dissertação de mestrado acadêmico apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Comunicação e Automação, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Sistemas de Comunicação e Automação.

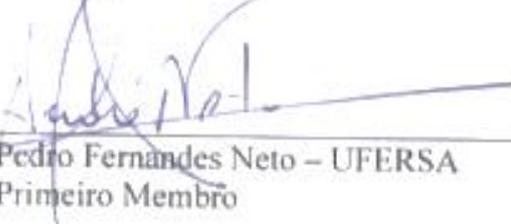
Defendida em: 17/06/2016.

BANCA EXAMINADORA



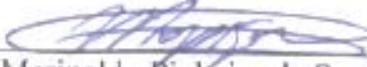
---

Prof. Dr. Idalmir de Souza Queiroz Junior – UFERSA  
Presidente (Orientador)



---

Prof. Dr. André Pedro Fernandes Neto – UFERSA  
Primeiro Membro



---

Prof. Dr. Marinaldo Pinheiro de Sousa Neto – IFRN  
Membro Externo

## DEDICATÓRIA

Aos meus familiares, que sempre me dão apoio para seguir minhas decisões.

A meus amigos e colegas, por estarem presentes e me darem forças e motivação para me firmar em meus objetivos.

Ao meu orientador, ao meu co-orientador, e aos professores que me incentivaram em meus estudos, por terem me ajudado na conclusão desse trabalho.

## AGRADECIMENTOS

A Deus por tudo o que eu sou e tudo o que me cerca, por me permitir uma existência sem maiores privações e por me colocar nos caminhos ideais das melhores formas;

À minha família, minha mãe, por tudo que representa na minha vida, e meu irmão, por ser um ponto de referência para mim;

Aos meus “antigos” amigos, por me apoiarem – mesmo distantes e mesmo sem muito contato – em todas as etapas da minha vida, por acreditarem em mim e me darem ainda mais motivos de seguir firme por uma carreira bem sucedida, sem eles, seria muito difícil uma recuperação rápida e bem posicionada em alguns casos onde muito do que se vê é desestímulo e negatividade.

Aos meus novos colegas e amigos do mestrado, que, mesmo com tantas obrigações, mesmo com um melhor embasamento de muitas disciplinas de cursos diferentes, se disponibilizaram a me dar um suporte – muito melhor até do que eu esperaria, dadas as circunstâncias para produzir em suas pesquisas – e, além de tudo, me proporcionaram momentos agradáveis, onde, em pouco tempo, se fizeram especiais para mim.

Aos meus professores – dentre os quais, Idalmir de Souza, Manoel Quirino e Humberto Dionísio, que estiveram em relações mais estreitas comigo e com o presente trabalho – que, de suas distintas formas, me deram motivação e se dispuseram a passar um pouco de seus nada pequenos conhecimentos para mim.

À CBMM pelo fornecimento do  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ . Às instituições UFERSA, UERN e UFRN pelos serviços e estruturas disponibilizados para a realização dos experimentos desse trabalho, bem como à CAPES pelo auxílio financeiro.

Valeu a pena? Tudo vale a pena  
Se a alma não é pequena.  
Quem quer passar além do bojador  
Tem que passar além da dor.

(Fernando Pessoa)

## RESUMO

No Brasil estão localizadas as duas maiores reservas de nióbio do mundo – cerca de 96% da produção mundial –, e, por esta razão, têm sido incentivados os estudos sobre as suas mais diversas aplicações tecnológicas. Outra vertente de estudos em destaque atualmente é a do processamento de materiais cerâmicos com micro-ondas, que se apresenta como um método alternativo à sinterização em forno mufla – o uso de micro-ondas envolve conversão de energia eletromagnética, em lugar de transferência de calor, oferecendo vantagens ao ser usado por proporcionar a obtenção de uma maior homogeneidade estrutural do material e uma redução do tempo e da energia gasta durante o processamento. A proposta deste trabalho é a realização da caracterização de propriedades elétricas do pentóxido de nióbio ( $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ) puro ou dopado com molibdênio usando a tecnologia da metalurgia do pó e a análise da influência sobre estas dopagens quando seu processamento de sinterização se dá em forno mufla ou em forno de micro-ondas. As caracterizações feitas foram das propriedades elétricas de permissividade elétrica e tangente de perdas além de ter sido estudada a viabilidade da dopagem e/ou o tipo de processamento – na etapa de sinterização – do material para aplicação como materiais absorvedores de radiação eletromagnética. A variação das concentrações nas dopagens indicou o quão eficaz, como agente dopante, o molibdênio será na matriz cerâmica, convertendo a energia de micro-ondas em energia térmica. Os resultados mostraram que o aumento da dopagem do pentóxido de nióbio com molibdênio (com limite de dopagem de 1%) aliado à sinterização em forno de micro-ondas garantiu o aumento dos valores de condutividade do material, tornando-o mais eficiente para sua aplicação como absorvedor de radiação eletromagnética.

*Palavras-Chave:* MARE.  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  dopado com Mo. Sinterização por micro-ondas.

## ABSTRACT

In Brazil are located the two largest niobium reserves of the world – about 96% of the world production – and, for this reason, have been encouraged studies on its most diverse technological applications. Another aspect of prominent studies is currently the processing of ceramic materials with a microwave, which is presented as an alternative method of sintering in a muffle furnace – the use of microwave involves electromagnetic energy conversion instead of heat transfer, offering advantages when used for providing the obtainment of greater structural homogeneity of the material and a reduction of time and energy expended during processing. This work aims to perform the characterization of electrical properties of niobium pentoxide ( $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ) pure or doped with molybdenum (Mo) and to do an analysis of the influence of this doping when its sintering process occurs in muffle furnace or microwave. The properties characterized were the permittivity and loss tangent. Will be studied the viability of doping and/or processing the material for use as absorbent materials of electromagnetic radiation. The variation of concentrations in doping will indicate how effective, as a doping agent, molybdenum will be in the ceramic matrix, converting energy of microwave into heat energy. The results showed that the increase of doping of the niobium pentoxide with molybdenum (with 1% doping limit) combined with the sintering oven microwave increased the material conductivity values, making it more efficient in its use as absorber electromagnetic radiation.

*Keywords:* Microwave absorbers.  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  doped with Mo. Microwave Sintering.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Propriedades do nióbio. ....	22
Tabela 2: Propriedades do molibdênio. ....	25
Tabela 3: Aplicações e usos do espectro eletromagnético por faixa de frequência regulamentado pela Agência Nacional de Telecomunicações. ....	34
Tabela 4: Lista de guias de ondas retangulares. ....	50
Tabela 5: Valores de atenuação (dB) e porcentagem de energia absorvida no material	72
Tabela 7: Materiais identificados em EDX para corpo de prova de Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> sinterizado em forno de micro-ondas.....	84
Tabela 8: Materiais identificados em EDX para corpo de prova de Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> e 0.5% de molibdênio sinterizado em forno mufla.....	84
Tabela 9: Materiais identificados em em EDX para corpo de prova de Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> e 0.5% de molibdênio sinterizado em forno de micro-ondas. ....	84
Tabela 10: Materiais identificados em EDX para corpo de prova de Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> e 1% de molibdênio sinterizado em forno mufla.....	85
Tabela 11: Materiais identificados em EDX para corpo de prova de Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> e 1% de molibdênio sinterizado em forno de micro-ondas. ....	85
Tabela 12: Materiais identificados em EDX para corpo de prova de Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> e 2% de molibdênio sinterizado em forno de micro-ondas. ....	85
Tabela 13: Valores medidos das melhores regiões onde há a dissipação de energia eletromagnética do corpo de prova de dopagem de 0.5% e sinterizado em forno de micro-ondas. ....	94
Tabela 14: Valores medidos das melhores regiões onde há a dissipação de energia eletromagnética do corpo de prova de dopagem de 1% e sinterizado em forno de micro-ondas. ....	94
Tabela 15: Valores de tangente de perdas, componentes reais e complexas de permissividade e condutividade do pentóxido de nióbio puro e dopado com 0.5% e 1% de molibdênio. ....	98
Tabela 16: Condutividades elétricas à temperatura ambiente para diferentes materiais condutores, semicondutores e isolantes.....	100

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ilustração da propagação da onda eletromagnética.....	31
Figura 2: Ilustração do espectro eletromagnético.....	31
Figura 3: Curvas do campo elétrico e campo magnético de uma onda plana em meio com perdas. a) e b) mostram E e H em $z = 0$ para todo t, respectivamente; c) e d) mostram E e H em $t = 0$ para todo z, respectivamente. Os campos decaem enquanto se propagam em z.....	45
Figura 4: Fotografias de exemplares de seções de guia de ondas retangular e circular.	48
Figura 5: Ilustração de guias de ondas joelhos e guias de ondas com torções de $90^\circ$ . ...	49
Figura 6: Ilustração do guia de onda retangular .....	50
Figura 7: Ilustração da propagação de campos - vista lateral do guia. ....	57
Figura 8: Esquema ilustrativo da propagação de onda com variação do ângulo $\theta$ de acordo com aumento da frequência. ....	58
Figura 9: Ilustração das linhas de campo para modo $TE_{10}$ em guia retangular. ....	59
Figura 10: Imagem de um carro de combate obtida por radar de imageamento em 30GHz. (a) Sem recobrimento MARE. (b) Com recobrimento MARE. ....	65
Figura 11: Fotografia de uma câmara anecóica para operação na faixa de frequências de 28MHz a 2GHz.....	67
Figura 12: Fotografias de objetos no interior de câmaras anecóicas para avaliação de compatibilidade eletromagnética. ....	67
Figura 13: Ilustração de um esquema geral dos possíveis caminhos da energia da onda eletromagnética incidente sobre um determinado material. ....	70
Figura 14: Fluxograma de preparação dos corpos de prova e etapas de verificação de eficiência do material para aplicação como material absorvedor de micro-ondas. ....	73
Figura 15: Fotografia de estufa usada na secagem dos pós. ....	74
Figura 16: Fotografia de balança de precisão. ....	74
Figura 17: Fotografia de torno mecânico usado para a mistura dos pós. ....	75
Figura 18: Fotografia de prensa hidráulica. ....	76
Figura 19: Fotografia de forno tipo mufla. ....	76
Figura 20: Fotografia de forno de micro-ondas convencional. ....	77
Figura 21: Fotografia de equipamento de EDX.....	77
Figura 22: Fotografia de equipamento de difratometria de raios-X. ....	78

Figura 23: Fotografia de microscópio eletrônico de varredura. ....	78
Figura 24: Fotografia de pós colocados em superfícies para análise no MEV.....	79
Figura 25: Fotografia de metalizador realizando a deposição de material condutor na superfície de partes dos corpos de prova. ....	79
Figura 26: Fotografia de partes de superfícies dos corpos de prova preparadas para análise em MEV. ....	80
Figura 27: Fotografia de analisador de Redes Vetorial Agilent. ....	80
Figura 28: Fotografias de antes e depois dos corpos de prova de pentóxido de nióbio dopados com nióbio e serem postos no forno para sinterização à temperatura de 900°C por 4h.....	83
Figura 29: Difratomogramas do pentóxido de nióbio dopado com 0.5% de molibdênio antes da sinterização e depois da sinterização tanto em forno mufla como em forno de micro-ondas. ....	86
Figura 30: Fotomicrografia da superfície de corpo de prova de pentóxido de nióbio dopado com 1% de molibdênio e sinterizado em forno de micro-ondas.....	87
Figura 31: Fotomicrografia da superfície de corpo de prova de pentóxido de nióbio dopado com 1% de molibdênio e sinterizado em forno de micro-ondas com maior aproximação.....	88
Figura 32: Fotomicrografia da superfície de corpo de prova de pentóxido de nióbio dopado com 1% de molibdênio e sinterizado em forno de micro-ondas e maior aproximação de outra região.....	88
Figura 33: Fotomicrografia dos grãos de molibdênio em escala onde é possível a comparação dos tamanhos das suas partículas com o tamanho das partículas de nióbio. ....	89
Figura 34: Fotomicrografia do grão de nióbio em escala onde é possível a comparação dos tamanhos das suas partículas com o tamanho das partículas de molibdênio. ....	90
Figura 35: Fotomicrografia afastada da região escolhida para comparação dos tamanhos das partículas (pentóxido de nióbio dopado com 0.5% de nióbio).....	90
Figura 36: Fotomicrografia da mistura do pentóxido de nióbio dopado com 1% de molibdênio.....	91
Figura 37: Curvas de valores de permissividade complexa por valores de frequência de operação de pentóxido de nióbio puro ou dopado com 0.5% de molibdênio e sinterizado em forno mufla ou forno de micro-ondas.....	92

Figura 38: Curvas de valores de permissividade complexa por valores de frequência de operação de pentóxido de nióbio puro ou dopado com 1% de molibdênio e sinterizado em forno mufla ou forno de micro-ondas.....	93
Figura 39: Ilustração de guia de ondas com um bloco de material absorvedor inserido em seu interior em software <i>Ansoft HFSS</i> ®. ....	95
Figura 40: Sequência de imagens de como ocorreu a propagação de onda eletromagnética em bloco de pentóxido de nióbio dopado com 1% de molibdênio e sinterizado em forno de micro-ondas inserido num guia de ondas WR 510 simulado em software <i>Ansoft HFSS</i> ®. ....	97
Figura 41: Sequência de imagens de como ocorreu a propagação de onda eletromagnética em bloco de pentóxido de nióbio dopado com 1% de molibdênio e sinterizado em forno tipo mufla inserido num guia de ondas WR 510 simulado em software <i>Ansoft HFSS</i> ®. ....	98
Figura 42: Sequência de imagens de como ocorreu a propagação de onda eletromagnética em bloco de pentóxido de nióbio puro e sinterizado em forno tipo mufla inserido num guia de ondas WR 510 simulado em software <i>Ansoft HFSS</i> ®.....	99
Figura 43: Imagem da escala de condutividade elétrica dos materiais ordenados de isolantes, semicondutores e condutores (onde “*C.P.Analisados” são os corpos de prova dos materiais estudados no presente trabalho). ....	101

## NOMENCLATURA

### *Letras Latinas*

- $\vec{B}$  – Vetor de densidade de fluxo magnético  
c – Velocidade de propagação da onda no espaço livre  
 $\vec{D}$  – Vetor de densidade de fluxo elétrico  
d – Espessura do absorvedor  
 $\vec{E}$  – Vetor campo elétrico  
 $E_a$  – Energia absorvida  
 $E_d$  – Energia dissipada devido à atenuação do espaço livre  
 $E_i$  – Energia incidente  
 $E_r$  – Energia refletida  
 $E_t$  – Energia transmitida  
f – Frequência de operação da onda  
 $f_c$  – Frequência de corte  
 $\vec{H}$  – Vetor de campo magnético  
h – Constante de onda escalar  
 $\vec{J}$  – Vetor densidade de corrente elétrica  
 $J_{cs}$  – Densidade de corrente de condução  
 $J_{ds}$  – Densidade de corrente de deslocamento  
 $tg\theta$  – Tangente de perdas  
v – Velocidade de propagação da onda  
 $v_f$  – Velocidade de fase  
 $v_g$  – Velocidade de grupo  
Z – Impedância de entrada na superfície

### *Letras Gregas*

- $\alpha$  – Constante de atenuação  
 $\alpha_c$  – Atenuação na parede condutora de guia de onda  
 $\alpha_d$  – Atenuação devida a perdas no dielétrico

$\beta$  – Constante de fase  
 $\beta_g$  – Constante de fase característica em guia de onda  
 $\gamma$  – Constante de propagação de onda  
 $\varepsilon$  – Permissividade elétrica  
 $\varepsilon_0$  – Permissividade elétrica no vácuo  
 $\varepsilon_r$  – Permissividade elétrica relativa  
 $\varepsilon_r'$  – Componente real da permissividade relativa complexa  
 $\varepsilon_r''$  – Componente complexa da permissividade relativa complexa  
 $\eta$  – Impedância intrínseca  
 $\theta$  – Ângulo de perdas do meio  
 $\lambda$  – Comprimento de onda  
 $\lambda_g$  – Comprimento de onda em guia de onda  
 $\mu$  – Permeabilidade magnética  
 $\mu_0$  – Permeabilidade magnética no vácuo  
 $\mu_r$  – Permeabilidade relativa  
 $\mu_r'$  – Componente real da permeabilidade relativa complexa  
 $\mu_r''$  – Componente complexa da permeabilidade relativa complexa  
 $\rho$  – Densidade volumétrica de cargas livres  
 $\sigma$  – Condutividade dielétrica  
 $\omega$  – Frequência angular

### ***Abreviações***

EMI – *Electromagnetic Interference*  
EMC – *Electromagnetic Compatibility*  
GPS – *Global Positioning System*  
HFSS – *High Frequency Structural Simulator*  
HF – *High Frequency*  
MARE – *Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética*  
MF – *Medium Frequency*  
RADAR – *Radio Detection and Ranging*  
RAM – *Radar Absorbent Materials*  
RCS – *Radar Cross Section*

RF – *Radio Frequency*

SAR – *Synthetic Aperture Radar*

TE – *Transverse Electric*

TEM – *Transverse Electromagnetic*

TM – *Transverse Magnetic*

UHF – *Ultra High Frequency*

VHF – *Very High Frequency*

### ***Siglas***

ANATEL – Agência Nacional de Telecomunicações

CGEE – Centro de Gestão e Estudos Estratégicos

CBMM – Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração

EIA – *Electronics Industry Association*

IEC – *International Electrotechnical Commission*

PPGSCA – Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Comunicação e Automação

UFERSA – Universidade Federal Rural do Semiárido

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	19
1.1. OBJETIVOS GERAIS .....	20
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	20
<b>2. NIÓBIO, PENTÓXIDO DE NIÓBIO E MOLIBDÊNIO</b> .....	22
<b>3. METALURGIA DO PÓ</b> .....	27
3.1 COMPACTAÇÃO .....	28
3.2 SINTERIZAÇÃO .....	29
<b>4. PROPAGAÇÃO DA ONDA ELETROMAGNÉTICA</b> .....	31
4.1 O ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO .....	31
4.2 EQUAÇÕES DE MAXWELL .....	35
4.2.1. Soluções gerais para ondas TEM, TE e TM .....	39
4.2.2. Ondas planas no espaço livre e em dielétricos sem perdas .....	41
4.2.3. Propagação da onda em meios com perdas .....	42
<b>5. GUIAS DE ONDAS</b> .....	47
5.1. TIPOS DE GUIAS DE ONDA .....	48
5.2. EQUAÇÃO DE ONDA EM GUIA DE ONDA RETANGULAR .....	50
5.2.1. Modos TM e TE em guia de onda retangular .....	52
5.2.2. Frequência de corte .....	56
5.2.3. Parâmetros característicos dos modos .....	59
5.3. ATENUAÇÃO EM GUIA DE ONDA RETANGULAR .....	62
<b>6. MATERIAIS ABSORVEDORES DE RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA</b> ..	64
6.1. ESTADO DA ARTE SOBRE MATERIAIS ABSORVEDORES .....	64
6.2. TIPOS DE MATERIAIS ABSORVEDORES .....	68
6.3. PARÂMETROS DE MATERIAIS ABSORVEDORES .....	69
<b>7. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	73

7.1. SECAGEM DOS PÓS .....	73
7.2. DOPAGEM DO PENTÓXIDO DE NIÓBIO COM MOLIBDÊNIO .....	74
7.3. PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA .....	75
7.4. ANÁLISE DE COMPOSIÇÕES EM EQUIPAMENTO DE EDX .....	77
7.5. ANÁLISE DE HOMOGENIDADE DAS SUPERFÍCIES DOS CORPOS DE PROVA EM MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA (MEV) .....	78
7.6. CARACTERIZAÇÃO DE PROPRIEDADES ELÉTRICAS EM ANALISADOR DE REDES VETORIAL E SIMULAÇÃO DE ABSORÇÃO DE RADIAÇÃO EM AMBIENTE VIRTUAL .....	80
<b>8. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>82</b>
<b>9. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....</b>	<b>102</b>
<b>10. REFERÊNCIAS.....</b>	<b>105</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Mais de 90% das reservas de nióbio do mundo está localizado no Brasil, e, apesar disso, quase toda a produção do material é exportada, dessa forma, estudos diversos sobre o material e novas aplicações em tecnologias renderiam bons avanços para a comunidade científica (MOTTA; 2011).

A tecnologia de micro-ondas aplicada ao processo de sinterização de materiais cerâmicos é uma vertente das técnicas de processamentos de materiais muito explorada ultimamente e que tem se destacado por possibilitar ganhos de produção e vantagens, de forma geral, em relação a processos convencionais, como sinterização em forno convectivo (PINHEIRO, 2013).

Sendo o pentóxido de nióbio ( $Nb_2O_5$ ) um material maleável e que tem estudado a fim de serem encontradas aplicações diversas, como na biomedicina, sistemas de comunicação e como materiais de revestimento, o mesmo foi escolhido para ser estudado neste trabalho. O ponto de fusão deste material é aproximadamente  $1485^\circ C$ , dessa forma, um processo de fabricação adequado para se trabalhar com este material é o da metalurgia do pó (CERNIAK, 2012).

Este trabalho tem como finalidade o estudo da viabilidade deste material dopado com o pó de molibdênio como aditivo ao pentóxido de nióbio para fim de sua aplicação como composto absorvedor de micro-ondas, onde, no caso, as partículas metálicas atuam como material suscepto na matriz cerâmica de forma que, ao serem atingidas pelas ondas eletromagnéticas, suas estruturas moleculares serão excitadas e parte da energia incidente é convertida em calor. A influência dessa dopagem será observada por meio de um estudo comparativo com propriedades elétricas já caracterizadas do pentóxido de nióbio puro. Além desse estudo comparativo, será estudada a influência do processo de sinterização por micro-ondas e do processo de sinterização em forno condutivo.

Na organização deste trabalho, inicialmente, será feita uma identificação dos principais objetivos do trabalho, e, logo em seguida, uma contextualização das propriedades do nióbio e suas aplicações, principalmente no cenário de novas aplicações alternativas e a exploração deste como um recurso abundante no Brasil. Seguindo sobre o pentóxido de nióbio, será mostrada a forma na qual será trabalhado o material nos experimentos realizados, que é a técnica da metalurgia do pó, onde estão detalhados os fenômenos que ocorrem no processo e as variáveis mais importantes a serem estudadas.

Além disso, para uma dada aplicação como material absorvedor e para melhor entendimento das caracterizações elétricas, serão mostradas as equações que regem os modos de propagação de ondas eletromagnéticas tanto em espaço livre como em meios com perdas – que é o foco da aplicação do material.

Será feita também a explicação de uma das principais possíveis aplicações e usos do material proposto em dispositivos denominados guias de ondas, que são usados tanto para direcionamentos como para transmissões de ondas, inclusive para caracterização de propriedades eletromagnéticas de materiais. A seguir haverá uma descrição de funcionalidades dos materiais absorvedores de ondas eletromagnéticas – como já foi mencionado, o foco de aplicação do pentóxido de nióbio dopado com molibdênio –, bem como tipos e principais propriedades a serem estudadas para a obtenção de um material eficiente em sua finalidade.

Na parte experimental será descrita a forma na qual foram trabalhados os materiais a fim da obtenção de um composto absorvedor e detalhamento das etapas e métodos de caracterização que foram usados. Em seguida serão mostrados os principais resultados obtidos e a descrição das propriedades que tiveram mudanças em comparação ao pentóxido de nióbio puro que tornam o composto utilizável como outro fim – absorção de energia eletromagnética. Por fim, são tidas perspectivas para trabalhos futuros e realização de experimentos que podem vir a facilitar a compreensão de todas as mudanças das propriedades estudadas dos materiais.

### 1.1. OBJETIVOS GERAIS

Desenvolvimento de material absorvedor de radiação eletromagnética e caracterização de suas propriedades elétricas.

### 1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudar o limite de dopagem do pentóxido de nióbio com molibdênio para uso como material absorvedor de radiação eletromagnética;
- Realizar medições de propriedades físicas em equipamentos de Microscópio de Varredura Eletrônica (MEV) e equipamentos de EDX (espectrômetro de raios X) e DRX (difratômetro de raios X);

- Verificar a eficácia da sinterização do pentóxido de nióbio dopado com molibdênio por micro-ondas (do ponto de vista de características típicas de materiais trabalhados via metalurgia do pó e sinterizados em forno convencional convectivo);
- Medir permissividade elétrica (componentes reais e imaginárias) e tangente de perdas dos materiais;
- Delimitar as melhores faixas de frequências de micro-ondas para aplicação do material como absorvedor de ondas eletromagnéticas;
- Estudar qual a influência da mudança de concentrações de agente dopante sobre quais faixas de frequência que tornam o material um bom candidato a ser usado como absorvedor de ondas eletromagnéticas;
- Simular em ambiente virtual, com dados obtidos em medições elétricas, a eficácia do material num volume como bloco absorvedor de radiação eletromagnética.

## 2. NIÓBIO, PENTÓXIDO DE NIÓBIO E MOLIBDÊNIO

Nesta seção estarão presentes informações referentes às principais características do nióbio, do pentóxido de nióbio e do molibdênio, suas propriedades físicas e suas aplicações, bem como uma contextualização histórica sobre estes materiais.

O nióbio é um elemento metálico, dúctil, brilhante e mole de número atômico 41 e de especificações indicadas na Tabela 1. Possui baixa resistência à oxidação e tem propriedade de supercondutividade em temperaturas inferiores à  $-264^{\circ}\text{C}$  (SILVA, 2001; MSPC, 2007).

<b>Grandeza</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
Massa específica do sólido	8570	$\text{kg/m}^3$
Ponto de fusão	2477	$^{\circ}\text{C}$
Calor de fusão	26,4	$\text{kJ/mol}$
Ponto de ebulição	4742	$^{\circ}\text{C}$
Calor de vaporização	682	$\text{kJ/mol}$
Eletronegatividade	1,6	Pauling
Estados de oxidação	+5+3	-
Resistividade elétrica	15	$10^{-8} \Omega \text{ m}$
Condutividade térmica	53,7	$\text{W}/(\text{m}^{\circ}\text{C})$
Calor específico	265	$\text{J}/(\text{kg}^{\circ}\text{C})$
Coefficiente de expansão térmica	0,73	$10^{-5} (1/^{\circ}\text{C})$
Coefficiente de Poisson	0,4	-
Módulo de elasticidade	105	GPa
Velocidade do som	3480	m/s
Estrutura cristalina	Cúbica de Corpo Centrado	-

Tabela 1: Propriedades do nióbio.

Fonte: MSPC, 2007.

A descoberta desse metal deu-se no início do século passado, por Charles Hatchett, na Inglaterra. A origem do seu nome foi uma homenagem à América, de onde proveio o mineral, do qual o metal foi separado e denominado por ele como columbium. A ocorrência de Nióbio, na natureza, está associada aos pegmatitos, sob a forma de colombita-tantalita, ou associada a carbonatitos de maciços alcalinos, que constituem o

mineral denominado pirocloro. Desde 1932, o ferro-colômbio vem sendo utilizado para melhorar a qualidade dos aços e, como carboneto, é utilizado para a fabricação de ferramentas de corte rápido (SOUZA, 2012).

Após a sua descoberta em 1950, quase que simultaneamente, em depósitos no Canadá e no Brasil (Araxá – MG), o nióbio ganhou relevância no cenário mundial, com abundância de produção primária do metal e larga aplicação em desenvolvimento de materiais de engenharia, destacando-se as ligas especiais para a indústria espacial e nuclear (MOTTA, 2011).

O Brasil é o maior produtor de nióbio no mundo, com cerca de 96% da produção mundial, possuindo 90% das reservas mundiais (5,2 milhões de toneladas de óxido de nióbio). Com 96,3% das reservas em Minas Gerais, a Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração – CBMM – detém a maior parte da extração e produção de nióbio nacional. A produção nacional vem crescendo devido ao aquecimento no mercado de ferroligas, provocado pela elevada expansão do PIB dos países asiáticos e pelo aumento da produção mundial de aço bruto (CBMM, 2012).

Apesar do Brasil ser o maior exportador de Nióbio do mundo, o desenvolvimento de produtos manufaturados com a utilização desse minério no país ainda é pequena (LETTUNE, 2012).

As principais empresas produtoras no Brasil são: Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (CBMM), 60,7%; Anglo American Brasil (Mineração Catalão), 21%; Mineração Taboca, 12,8% e outros (5,5%). No Brasil, os principais estados produtores são: MG (61%), GO (21%) e AM (12%) (OLIVEIRA, 2011).

Em relação às propriedades físicas e mecânicas do nióbio, há uma grande semelhança com as do titânio, como alto ponto de fusão, boa resistência mecânica e etc. Contudo, atualmente o número de publicações nacionais e internacionais explorando a biocompatibilidade do nióbio ainda é muito menor do que o do titânio (BONADIO, 2011).

Na natureza é encontrado o nióbio associado com o tântalo (Ta), sendo obtido a partir de minérios como a columbita-tantalita, o pirocloro e a loparita. O nióbio é considerado um metal refratário, denominação que implica ponto de fusão superior ao do ferro. Como já mencionado, sendo o seu ponto de fusão de 2468°C e sua densidade levemente superior ao do ferro, de 8,55 g/cm<sup>3</sup>, estes valores podem ser considerados moderados em comparação aos outros metais refratários. Seu aspecto metálico apresenta-se com coloração cinza e de brilho platinado quando polido. A estrutura

cristalina é cúbica de corpo centrado (CCC) e é considerado um metal de baixa dureza e de alta ductilidade (CBMM, 2012).

Sendo o nióbio um metal refratário, possui alta resistência ao calor e ao desgaste ele é usado em diversas aplicações, principalmente, em altas temperaturas. Dos metais considerados refratários os quatro principais são: nióbio, tântalo, molibdênio e tungstênio. Metais refratários possuem características interessantes como: alto ponto de fusão, baixa ductilidade a temperatura ambiente, ligações atômicas fortes, estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (CCC) e densidade elevada, sendo o menos denso o nióbio, tornando-o ideal para diversas aplicações, como por exemplo, na indústria aeroespacial, pois resiste às altas temperaturas a que as peças são submetidas e não tem uma densidade tão alta quanto os outros. Também possuem estabilidade dimensional, estabilidade mecânica, estabilidade ao choque térmico, baixa permeabilidade e baixa condutividade térmica. Também existem materiais cerâmicos refratários, que exibem propriedades diferentes dos metais refratários, porém também são utilizados para aplicação em altas temperaturas (CERNIAK, 2012).

Outra característica interessante que o nióbio apresenta é a elevada resistência à corrosão, onde se dá a formação de uma camada passiva que pode ser composta de pentóxido de nióbio ( $Nb_2O_5$ ), dióxido de nióbio ( $NbO_2$ ) ou óxido de nióbio ( $NbO$ ), podendo ser uma mistura dos três. A excelente resistência à corrosão do nióbio em diversos meios é atribuída, pela literatura, à presença de um filme superficial de óxido estável ( $Nb_2O_5$ ), protetor e fortemente aderente que se forma instantaneamente ao ar (MOTTA, 2011).

O nióbio também é utilizado em cerâmicas finas, as quais têm diversas aplicações, como por exemplo, em lentes óticas, atuadores cerâmicos e capacitores cerâmicos. Nessas aplicações o nióbio é utilizado na forma de óxido de nióbio com 99,9% de pureza. Outra aplicação é em filtros especiais de receptores de TV, os quais utilizam monocristais de niobato de lítio, que exigem pentóxido de nióbio de altíssima pureza, com teor de 99,99%. Outras aplicações de cerâmicas que utilizam nióbio são em determinados elementos estruturais resistentes ao calor e à abrasão, ferramentas e em peças de motor (CERNIAK, 2012; MOTTA, 2011).

Já o molibdênio é um metal de transição de coloração branco prateado e é um material muito duro, possuindo uma dureza de 5,5 na escala de Mohs. Número atômico 42, o molibdênio tem um ponto de fusão de  $2623^{\circ}C$ , que é o sexto maior entre os elementos naturais, possuindo um dos menores coeficientes de expansão térmica entre

os metais utilizados comercialmente. O Molibdênio é o 54º elemento mais abundante na crosta terrestre, o 25º mais abundante nos oceanos e é o 42º elemento mais abundante no universo. Na Tabela 2 também são mostradas outras propriedades do molibdênio (EMSLEY, 2001; MSPC, 2007).

<b>Grandeza</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
Massa específica do sólido	10280	kg/m <sup>3</sup>
Ponto de fusão	2623	°C
Calor de fusão	36	kJ/mol
Ponto de ebulição	4639	°C
Calor de vaporização	600	kJ/mol
Eletronegatividade	2,16	Pauling
Estados de oxidação	+6+5+4 +3+2 0	-
Resistividade elétrica	5	10 <sup>-8</sup> Ω
Condutividade térmica	138	W/(m°C)
Calor específico	251	J/(kg°C)
Coefficiente de expansão térmica	0,48	10 <sup>-5</sup> (1/°C)
Coefficiente de Poisson	0,31	-
Módulo de elasticidade	329	GPa
Velocidade do som	5400	m/s
Estrutura cristalina	Cúbica de Corpo Centrado	-

Tabela 2: Propriedades do molibdênio.

Fonte: MSPC, 2007.

A descoberta do molibdênio como um novo minério se deu por volta de 1780, mas, só cerca de um século após seu isolamento é que o molibdênio teve seu uso industrial inserindo-o em ligas com aço, que demonstraram ser promissoras por aumentarem a dureza. Apesar disso, os esforços para tal manufatura foram muito altos e não houve um bom resultado na produção. Já durante a segunda Guerra Mundial, a demanda pelo elemento aumentou severamente, que era usado para blindagem de veículo quanto como um substituto para o tungstênio no aço rápido, oferecendo vantagens como melhor proteção, aumento da velocidade dos veículos e mais facilidade na manobra (EMSLEY, 2001; MILLHOLLAND, 1941).

Boa parte da produção (cerca de 85%) de molibdênio é utilizada em aplicações metalúrgicas como ligas, o restante é usado, basicamente, como compostos em aplicações químicas. O molibdênio tem boa aplicação em ligas de aço devido à sua alta resistência à corrosão e soldabilidade. Por causa de sua baixa densidade e preço mais estável, o molibdênio é algumas vezes utilizado no lugar do tungstênio. A capacidade do molibdênio de resistir a temperaturas extremas sem expandir significativamente ou amolecer o torna útil em aplicações que envolvem calor intenso, incluindo fabricação de blindagens, partes de aeronaves, contatos elétricos, motores industriais e filamentos (LONDON METAL EXCHANGE, 2014).

### 3. METALURGIA DO PÓ

Nesta seção serão abordados conceitos sobre a tecnologia do pó – técnica usada na confecção dos corpos de prova do material estudado no presente trabalho –, bem como características que a tornem vantajosa sua escolha em determinados processos de fabricação e as principais etapas para a obtenção do produto final.

A metalurgia do pó é descrita por um processo cuja utilização se dá em determinados setores onde se consegue produzir peças com algumas características estruturais e físicas difíceis de serem obtidas com outros processos metalúrgicos (CERNIAK, 2012).

Algumas vantagens são: a economia de material, pois as perdas de matéria prima são mínimas; eliminação ou redução do processo de usinagem, pois as peças já são compactadas e sinterizadas no formato desejado com bom acabamento superficial; é possível a produção de peças com formatos complexos; facilidade de automação do processo produtivo; controle da porosidade; redução dos gastos com energia comparado com outros processos como usinagem ou fundição; boa homogeneidade da microestrutura; boa resistência à fadiga e é menos agressivo ao meio ambiente devido à economia de matéria prima e energia (CERNIAK, 2012 apud. GOMES, 1994).

Eventualmente, dependendo da aplicação e de como se apresenta o pó – ou os pós –, é importante a mistura e homogeneização do material. Tal operação tem como finalidade a garantia de maior contato entre as partículas, considerando-se que, quanto maior a uniformidade do tamanho de partículas do material a ser misturado ou homogeneizado, tanto maior será a possibilidade de serem obtidos resultados uniformes e consistentes. Por outro lado, particulados menores apresentam forte tendência a segregar. Se possível, a eliminação dessas partículas maiores deveria ser eliminada. A homogeneização também pode servir para alterar a densidade aparente ou a velocidade de escoamento do pó, e, eventualmente, algumas outras propriedades, porque durante a operação pode ocorrer uma certa redução do tamanho da partícula, assim como um certo arredondamento de sua forma e ainda, eventualmente, um certo amaciamento de sua superfície (CHIAVERINI, 2001).

Para a obtenção de um produto usando-se a metalurgia do pó – depois da obtenção do material – são necessárias duas etapas principais: a compactação e a sinterização (CHIAVERINI, 2001).

### 3.1 COMPACTAÇÃO

A etapa de compactação é a primeira das operações de consolidação da metalurgia do pó, tendo como principais objetivos a conformação do pó na forma projetada, a garantia das dimensões finais – ou aproximadas – especificadas, levando em consideração as possíveis alterações dimensionais que possam ocorrer durante a sinterização, além da garantia da adequada densidade antes de sinterização e da resistência mecânica necessária para manuseio posterior (CHIAVERINI, 2001).

Existem várias técnicas de conformação, na tecnologia do pó a mais utilizada para metais é a compactação. A compactação pode ser feita de diferentes formas: em matriz de aço uni, bi e triaxial; prensagem isostática; prensagem isostática a quente; extrusão; vibratória; forjamento; compactação sem pressão, entre outras (TAVARES, 1993; CHIAVERINI, 2001).

Uma das técnicas de compactação bastante utilizadas em pesquisas é a compactação em matriz uniaxial. Apesar dessa técnica não oferecer uma homogeneidade na densidade tão boa quanto outras técnicas, ela é muito utilizada devida a sua rapidez, custo e simplicidade, tanto para compactar quanto para fabricar a matriz. Na compactação as partículas do pó escorregam e se rearranjam através de quebras ou deformações plásticas, levando a consolidação da amostra que é então chamada de corpo verde. A compactação, assim como a sinterização, também é responsável por algumas propriedades do produto, como porosidade, densidade, homogeneidade e resistência mecânica para o manuseio, de maneira que alguns parâmetros que influenciam essas propriedades devem ser controlados de acordo com a finalidade do produto como, pressão e tempo de compactação, geometria e tamanho da matriz e velocidade de ejeção (TAVARES, 1993).

A porosidade varia em função da pressão aplicada, de maneira que, quanto maior for a pressão, menor será a porosidade. A porosidade também depende da distribuição do tamanho de partículas e do formato destas. Quanto maior for a distribuição do tamanho de partículas, menor será a porosidade do material, pois as partículas pequenas preenchem os espaços entre as partículas grandes (MARCHI, 2003).

### 3.2 SINTERIZAÇÃO

Após obter o pó compactado este deverá passar pelo processo de sinterização onde ocorre a densificação e contração volumétrica devido a vários mecanismos de transporte de matéria, formando contornos de grãos e crescimento de pescoço interpartículas para sinterização por fase sólida (TAVARES, 1993).

Trata-se de um processo termodinâmico de não equilíbrio e irreversível onde o compactado adquire uma estrutura sólida. É o processo mais importante na tecnologia do pó, pois confere as propriedades físicas e mecânicas finais (TAVARES, 1993).

Apesar de ser um processo amplamente utilizado, ainda não existe uma teoria completa e definitiva para descrever o processo de sinterização. Existem diversas teorias aplicadas a casos específicos que concordam de maneira aproximadamente boa com resultados experimentais (BRITO; MEDEIROS; LOURENÇO, 2007).

A sinterização pode ser feita com pós metálicos, cerâmicos e compósitos (metal e cerâmica). Existem três tipos de sinterização: sinterização por fase sólida, sinterização por fase líquida e sinterização ativada.

A sinterização por fase líquida acontece quando mais de um elemento estão presentes no corpo a ser sinterizado, a temperatura da sinterização é geralmente acima do ponto de fusão do elemento com menor ponto de fusão, criando-se assim a fase líquida. O líquido aproxima as partículas promovendo assim uma densificação rápida e efetiva do material. Para que isso aconteça a fase sólida deve ter uma boa solubilidade no líquido e o líquido deve ter alta difusividade (CERNIAK, 2011).

Em determinados materiais o processo de sinterização pode ser melhorado através da sinterização ativada, onde são adicionadas pequenas quantidades de ativadores no metal que melhoram a sinterização, diminuindo o tempo e a temperatura da sinterização, reduzindo também os custos. Ao adicionar os ativadores, aumenta-se a taxa de sinterização com crescimento da taxa de transporte de matéria. O objetivo do estudo da sinterização ativada é determinar ativadores e quantidades desses ativadores que melhorem as propriedades físicas e mecânicas do material. A melhor eficiência do processo pode ser resultante de um aumento na força motora, na diminuição do potencial de ativação do processo ou na atuação de vários caminhos para o transporte de massa (FREIRE; FILGUEIRA; GOMES, 1993).

Na sinterização por fase sólida ou convencional o metal ou liga deve ser aquecido abaixo da temperatura de fusão de seus constituintes. A densificação se deve à

formação de contornos de grãos e crescimento de pescoço interpartículas, o crescimento dos pescoços interpartículas é devido a vários mecanismos de transporte de massa e no caso de metais o mecanismo predominante é a difusão. A sinterização pode ser dividida em três estágios (CERNIAK, 2011).

- Estágio inicial: ocorre a formação de contatos interpartículas devido a compactação e em seguida o crescimento de pescoços. Nesse estágio ainda não acontece o crescimento de grão, pois se isso acontecesse a área superficial aumentaria aumentando a energia.

- Estágio intermediário: inicia-se o crescimento de grãos e acontece a densificação do material devido ao decréscimo da porosidade, pois os poros são interceptados pelos contornos de grãos.

- Estágio final: a força motriz é baixa e restam poucos poros. Acontece o isolamento e a eliminação gradual da porosidade.

De forma geral, todas as teorias sobre sinterização poderiam ser resumidas pela consideração de que, na sinterização, ocorrem os seguintes estágios: ligação inicial entre as partículas e formação de um pescoço (onde, quando o material é aquecido, em consequência da difusão, são desenvolvidos contornos de grão); crescimento do pescoço; fechamento dos canais que interligam os poros (significando uma variação apreciável na natureza da porosidade da massa sinterizada); arredondamento dos poros; contração dos poros ou densificação; crescimento eventual dos poros (que, quando ocorre, acontece após os outros estágios da sinterização, que consiste na contração e eliminação de poros pequenos e isonados e no crescimento dos poros maiores) (CHIAVERINI, 2001).

Muitas variáveis do processo de sinterização influenciam as propriedades finais do corpo sinterizado. Esses parâmetros podem ser ajustados de maneira a melhorar as propriedades de acordo com as necessidades específicas de cada material. Algumas dessas variáveis estão interligadas umas com as outras tornando a compreensão mais complexa. Algumas dessas principais variáveis são: Temperatura de sinterização; Tempo de sinterização; Tamanho de partículas; Composição química; Porosidade; Atmosfera de sinterização (CHIAVERINI, 2001; CERNIAK, 2012).

#### 4. PROPAGAÇÃO DA ONDA ELETROMAGNÉTICA

Uma onda do campo eletromagnético, como mostrada na Figura 1, é formada por um campo elétrico ( $\vec{E}$ ) e um campo magnético ( $\vec{H}$ ) acoplados, que, ao se propagarem pelo espaço livre (na velocidade da luz), têm comprimentos de onda ( $\lambda$ ) diferentes, variando de acordo com a frequência ( $f$ ), onde  $\lambda$  é inversamente proporcional à frequência (ROUSS; PEARCE, 1995).

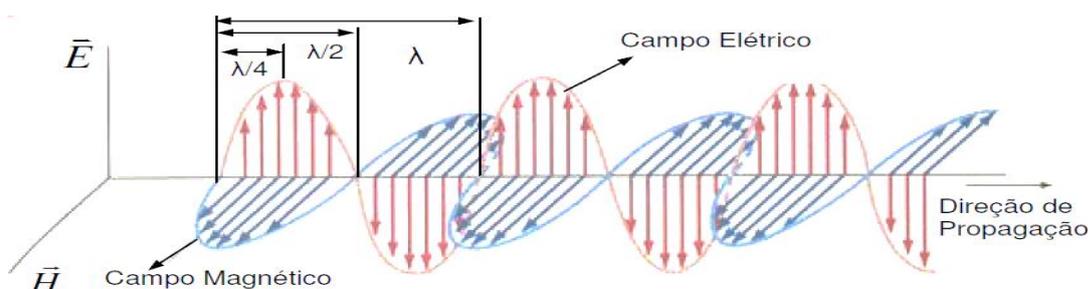


Figura 1: Ilustração da propagação da onda eletromagnética.

Fonte: EDMINISTER, 1980.

##### 4.1 O ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO

O valor da frequência, que corresponde a um comprimento de onda, individualiza o tipo de onda dentro do espectro eletromagnético, determinando sua aplicação, como mostrado na Figura 2, onde são identificadas várias regiões distintas (VIANA, 2015).

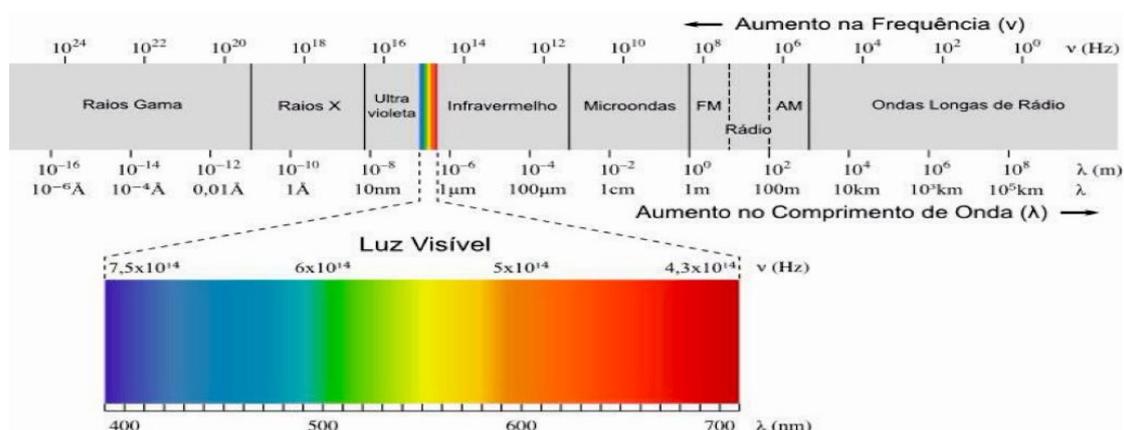


Figura 2: Ilustração do espectro eletromagnético.

Fonte: LIMA, 2015.

Cada faixa de frequência identificada tem uma aplicação determinada, como mostrado na Figura 2, sendo estas descritas a seguir:

- Ondas de radiofrequência: são ondas de baixas frequências (menores do que 300GHz e comprimentos de onda variando de centenas de metros até cerca de um milímetro. São ondas geradas e captadas por antenas de tamanhos apropriados, e são empregadas basicamente para transmissão de dados. Há diversas bandas de acordo com as faixas de frequência, sendo que as mais importantes são listadas a seguir:

- MF (Medium Frequency): faixas de frequências entre 300 e 3000kHz, comprimentos de onda de 1km a 100m, utilizada em rádio AM (ondas médias) e radioamadores, comunicação dada por meio de ondas de superfície ou com reflexão ionosférica, possui desvantagens por, para seu uso, necessitar de potências muito elevadas nos transmissores;

- HF (High Frequency): frequências entre 3 e 30MHz, comprimentos de onda de 100m a 10m, utilizada em rádio de ondas curtas, radiotelefonia móvel e comunicações telefônicas ou telegráficas, determinados serviços militares e outros sistemas que não exijam grandes larguras de faixa para transmissão;

- VHF (Very High Frequency): frequências entre 30 e 300MHz, comprimentos de onda de 10m a 1m, utilizada em rádio FM, televisão, auxílio a radio navegação, comunicação por satélite de órbita baixa, etc;

- UHF (Ultra High Frequency): frequências entre 300 e 3000MHz, comprimentos de onda de 1m a 100mm, utilizada em televisão, telefones celulares, internet sem fio, Bluetooth e GPS (EISENCRAFT, 2004;ANATEL, 2012).

- Micro-ondas: com faixas de frequências entre 3GHz e 170GHz e comprimentos de onda entre 10cm e 3mm. Essas faixas superiores da banda UHF podem também ser caracterizadas como micro-ondas. Alguns dos diversos usos de micro-ondas são: radares, fornos de micro-ondas, radioastronomia e telecomunicações ponto a ponto (ou seja, não sendo “broadcast” como televisão e rádio) em geral. Esta versatilidade deve-se ao fato de podermos focalizar as micro-ondas em feixes mais estreitos do que ondas de rádio, permitindo altas taxas de transmissão de dados e antenas menores. São produzidas por tubos de vácuo (magnetron e klystron, dentre outros), bem como por fontes astronômicas (VIANA, 2015).

- Radiação Infravermelha: frequências entre 300GHz e 400T Hz, comprimentos de onda de 1mm a 750nm, e é dividida em três faixas:

- Infravermelho distante: vai de 300GHz (1mm) a 30THz (10 $\mu$ m), é absorvida por modos rotacionais em moléculas de gases e pelo movimento molecular em líquidos;

- Infravermelho médio: vai de 30THz (10 $\mu$ m) a 120THz (2, 5 $\mu$ m), corresponde a faixa em que os corpos negros irradiam mais fortemente (incluindo a pele humana!), e é absorvida por vibrações moleculares;

- Infravermelho próximo: vai de 120 a 400THz (2.500 a 750nm): é uma faixa que pode ser detectada por filmes especiais sensíveis e sensores de imagem (visão noturna e termografia) (ANATEL, 2012).

- Radiação visível (luz): é a estreita faixa do espectro eletromagnético que sensibiliza o olho humano, com limites de comprimento de onda entre 760nm (vermelho) até 380nm (violeta), correspondendo a frequências entre 400 a 790THz, respectivamente. A luz é produzida essencialmente por transições atômicas em átomos excitados (como em lâmpadas fluorescentes), mas também devido à emissão térmica (como em lâmpadas incandescentes) (E-FÍSICA, 2007).

- Radiação Ultravioleta: com frequências e comprimentos de onda entre 400nm e 100nm, é invisível ao olho humano, mas causa efeitos importantes devido à energia associada, como ionização dos átomos (por isso é uma radiação ionizante, como raios-X e gama), o que tem implicações biológicas importantes. O Sol emite no ultravioleta, que é parcialmente filtrado pela atmosfera Terrestre, mas também pode ser produzido por lâmpadas de “luz negra” e outras desenvolvidas com esse propósito. Costuma-se dividir essa faixa do espectro em três bandas:

- UVA (400 – 320nm): corresponde à quase totalidade (99%) da radiação ultravioleta que chega à superfície Terrestre;

- UVB (320–280nm): é parcialmente absorvida pela camada de ozônio da atmosfera, mas a parcela que chega à superfície é responsável por danos biológicos, como o câncer de pele;

- UVC (280 – 100nm): totalmente absorvida na atmosfera, é usada como germicida quando produzida artificialmente (para a assepsia de instrumentos, por exemplo) (LOURENÇO, 2012).

- Raios-X: assim é denominada a faixa de frequências entre 30PHz (petahertz) e 30EHz (exahertz), ou comprimentos de onda entre 10 e 0, 01nm. Raios-X com comprimentos de onda abaixo ou acima de 0,2nm são chamados, respectivamente, de “duros” e “moles”. Como os raios-X duros são uma radiação muito energética, podem

penetrar facilmente a matéria, o que os torna úteis para a produção de imagens médicas ou de segurança (raios-X moles são facilmente absorvidos pelo ar). Como o comprimento de onda dos raios-X é da mesma ordem da separação atômica nos cristais, sofre difração pelos mesmos, a qual pode ser usada para obter informações sobre a estrutura da matéria. Raios-X são produzidos por transições atômicas de níveis internos (linhas de emissão) de certos elementos, como W e Mo, bem como no chamado processo de frenagem de radiação, o que pode ser conseguido em tubos de raios-X.

- Raios gama: são radiações de frequências superiores a 30EHz, ou comprimentos de onda inferiores a 0, 01nm, que são produzidas pelo decaimento nuclear de determinados radioisótopos. São radiações extremamente energéticas e provocam efeitos biológicos bastante pronunciados (VIANA, 2015).

A sociedade moderna utiliza o espectro eletromagnético em uma larga faixa de frequência em diversas aplicações, desde kHz até GHz, regulamentada no Brasil pela Agência Nacional de Telecomunicações – ANATEL. Alguns exemplos de utilização do espectro eletromagnético estão descritos na Tabela 3 (ANATEL, 2012):

<b>Faixa de frequência</b>	<b>Utilização</b>
130-160 kHz	Comunicação marítima
535-1625 kHz	Rádiodifusão
30 MHz – 300 MHz	Televisão, Rádiodifusão
400 MHz	Telefone sem fio doméstico
824 – 895 MHz	Telefonia celular
1.2 – 1.5 GHz	Sistema de Posicionamento Global ( <i>GPS</i> )
2.45 GHz	Forno de micro-ondas doméstico
2.7 – 2.9 GHz	Radares meteorológicos
3.0 – 3.5 GHz	Radares de aeroportos
2.4 – 5.0 GHz	Tecnologia sem fio “ <i>Bluetooth</i> ”
3.5 – 4.0 GHz	Internet por rádio
8.0 – 12 GHz	Radares militares de traqueamento aéreo
30 GHz	Radares de imageamento topográfico

Tabela 3: Aplicações e usos do espectro eletromagnético por faixa de frequência regulamentado pela Agência Nacional de Telecomunicações.

Fonte: ANATEL, 2012.

## 4.2 EQUAÇÕES DE MAXWELL

O acoplamento entre campo elétrico e magnético previsto nas equações de Maxwell implica que o campo eletromagnético se manifesta como uma perturbação que pode se propagar no espaço na forma de uma onda. Isso, em essência, permite a transmissão de informações entre pontos remotamente localizados. Diferentemente de ondas materiais, como as ondas acústicas que produzem o som, por exemplo, essa propagação pode se dar inclusive no vácuo. As características principais da manifestação ondulatória do campo eletromagnético são exploradas a seguir (FONTANA, 2013).

Ondas eletromagnéticas consistem de campos elétricos e magnéticos que, uma vez criados por fontes de variação rápida no tempo (correntes e cargas), viajam através do espaço independentemente das fontes que as produzem (NOTAROS, 2012).

Segundo Pinho, Rocha e Ferreira (2014), para a determinação das possíveis configurações do campo eletromagnético em um determinado meio, é necessário recorrer às equações de Maxwell na forma diferencial:

$$\nabla \times \vec{E} = \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{j} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (4)$$

onde  $\vec{E}$  é o vetor campo elétrico, em V/m;  $\vec{D}$  é o vetor de densidade de fluxo elétrico, em C/m<sup>2</sup>;  $\vec{H}$  é o vetor campo magnético, em A/m;  $\vec{B}$  é o vetor de densidade de fluxo magnético, em Wb/m<sup>2</sup>;  $\rho$  é a densidade volumétrica de cargas livres, em C/m<sup>3</sup>;  $\vec{j}$  é o vetor densidade de corrente elétrica, em A/m<sup>2</sup>.

Além dessas quatro equações acima, há ainda duas adicionais que relacionam as grandezas  $\vec{D}$  e  $\vec{E}$ , e  $\vec{B}$  e  $\vec{H}$  às constantes do dielétrico (que são a permissividade elétrica e a permeabilidade magnética), há também outra que relaciona  $\vec{j}$  e  $\vec{E}$  (que é a condutividade dielétrica), tais relações feitas valendo-se de características específicas do material e sua constituição. Nessa situação, as características relevantes a considerar são

a permissividade elétrica  $\varepsilon$ , a permeabilidade magnética  $\mu$  e a condutividade dielétrica  $\sigma$  (relações constitutivas do material). Se o meio for linear (onde suas características não dependem da intensidade do campo aplicado), homogêneo (suas características não dependem da posição) e isotrópico (suas características não dependem da orientação do campo aplicado), então  $\varepsilon$ ,  $\mu$  e  $\sigma$  são grandezas escalares (NOTAROS, 2012; PINHO; ROCHA; FERREIRA, 2014).

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (5)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (6)$$

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

Considerando-se, também, que, no meio, não há cargas livres ( $\rho = 0$ ) nem densidade de corrente de condução ( $\vec{J} = 0$ ), as quatro Equações 1 a 4 podem ser reescritas da seguinte forma:

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (8)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (9)$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0 \quad (10)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (11)$$

Com essas equações anteriores, é possível a determinação da equação de onda:

Fazendo-se a aplicação do operador rotacional a ambos os lados das quatro Equações 8 a 11, e fazendo substituições com as relações anteriores:

$$\begin{aligned} \nabla \times (\nabla \times \vec{E}) &= \nabla(\nabla \cdot \vec{E}) - \nabla^2 \vec{E} \\ -\mu \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \vec{H}) &= \nabla(0) - \nabla^2 \vec{E} \\ -\mu \frac{\partial}{\partial t} \left( \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) &= -\nabla^2 \vec{E} \\ \nabla^2 \vec{E} &= \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \end{aligned} \quad (12)$$

Esta equação é denominada equação da onda segundo o campo elétrico. De modo análogo, é possível a obtenção da equação de onda para o campo magnético, que é apresentada a seguir:

$$\nabla^2 \vec{H} = \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} \quad (13)$$

Uma vez determinadas as equações de onda genéricas, é possível usar a solução no regime forçado senoidal utilizando fasores, que é uma forma simples de se proceder com a sua resolução (PINHO; ROCHA; FERREIRA, 2014; KRAUS; CARVER, 1973).

Considerando que a componente do campo elétrico ao longo do eixo z é dada pela equação a seguir:

$$\vec{E}(z, t) = \vec{E}_0 \cos(\omega t + \phi) \quad (14)$$

A Equação 14 pode ser escrita como mostrado a seguir, onde o fator  $E_0 e^{j\phi}$  é denominado fador de  $\vec{E}$ :

$$\vec{E}(z, t) = \text{Re}\{\vec{E}_0 e^{j\phi} e^{j\omega t}\} \quad (15)$$

É importante salientar que, na notação fasorial, é omitido o fator  $[e^{j\omega t}]$ , no entanto, se é pretendida a recuperação da dependência temporal dos campos, esse termo tem que ser usado novamente.

A vantagem em se usar a notação fasorial é a simplificação de forma que:

$$\frac{\partial A e^{j\omega t}}{\partial t} = j\omega A e^{j\omega t} \rightarrow \frac{\partial}{\partial t} = j\omega \quad (16)$$

Ou seja, as derivadas em relação ao tempo podem ser substituídas por  $j\omega$ .

As Equações 12 e 13 no regime senoidal podem ser reescritas de acordo com as equações abaixo, em que E e H representam os fasores dos campos elétrico e magnético. Essas equações também são denominadas equações de Helmholtz.

$$\nabla^2 \vec{E} + \omega^2 \mu\epsilon \vec{E} = 0 \quad (17)$$

$$\nabla^2 \vec{H} + \omega^2 \mu\epsilon \vec{H} = 0 \quad (18)$$

Com:

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (19)$$

onde  $\gamma$  é a constante de propagação de onda;  $\alpha$  é a constante de atenuação e  $\beta$  é a constante de fase; Com  $\beta = \omega\sqrt{\mu\epsilon}$  tem-se  $\omega^2\mu\epsilon = \beta^2$  (KRAUS; CARVER, 1973).

Será considerada, agora, a propagação de uma onda incidente em um meio cuja seção transversal é constante. Nesse meio ideal, não há perdas no dielétrico ou nas paredes, de paredes perfeitamente condutoras está preenchido por um dielétrico sem perdas de parâmetros construtivos ( $\epsilon, \omega$ ), podendo estar limitados por um condutor perfeito ( $\sigma = \infty$ ). Com os campos de onda propagando-se no sentido positivo do eixo z, ou seja, admitindo que não há uma onda refletida, poderão ser escritos de acordo com a equação abaixo:

$$\vec{E}(x, y, z) = \vec{E}(x, y)e^{-\gamma z} \quad (20)$$

$$\vec{H}(x, y, z) = \vec{H}(x, y)e^{-\gamma z} \quad (21)$$

Admitindo que todas as componentes cartesianas do campo eletromagnético ( $E_x, E_y, E_z, H_x, H_y, H_z$ ) variem da forma apresentada pelas equações anteriormente citadas (sendo apenas funções de x e de y), as Equações 17 e 18 podem ser reescritas em um sistemas de coordenadas cartesiano.

$$\nabla_{xy}^2 \vec{E} + h^2 \vec{E} = 0 \quad (22)$$

$$\nabla_{xy}^2 \vec{H} + h^2 \vec{H} = 0 \quad (23)$$

onde h é uma constante dada pela equação abaixo:

$$h^2 = \gamma^2 + \mu\epsilon \quad (24)$$

$$h^2 = \omega^2\mu\epsilon - \beta_g^2 \quad (25)$$

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

$$\nabla_{xy}^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \quad (26)$$

É possível a obtenção das equações de onda escalares idênticas para cada componente fazendo-se uma expansão das Equações 22 e 23 com a aplicação o termo laplaciano (PINHO; FERREIRA; ROCHA, 2014; KRAUS; CARVER, 1973).

#### 4.2.1. Soluções gerais para ondas TEM, TE e TM

Nessa seção serão dadas as soluções para as equações de Maxwell para casos específicos de propagação de onda nos modos TEM (Transversal Eletro Magnético), TE (Transversal Elétrico) e TM (Transversal Magnético).

Assumindo os campos harmônicos no tempo com dependência  $e^{j\omega t}$  e propagação em guia de ondas ao longo do eixo z, têm-se as equações de campo elétrico e magnético (PINHO; ROCHA; FERREIRA, 2014):

$$H_x = -\frac{1}{h^2} \left( \gamma \frac{\partial H_z}{\partial x} - j\omega \varepsilon \frac{\partial E_z}{\partial y} \right) \quad (27)$$

$$H_y = -\frac{1}{h^2} \left( \gamma \frac{\partial H_z}{\partial y} + j\omega \varepsilon \frac{\partial E_z}{\partial x} \right) \quad (28)$$

$$E_x = -\frac{1}{h^2} \left( \gamma \frac{\partial E_z}{\partial x} + j\omega \varepsilon \frac{\partial H_z}{\partial y} \right) \quad (29)$$

$$E_y = -\frac{1}{h^2} \left( \gamma \frac{\partial E_z}{\partial y} + j\omega \varepsilon \frac{\partial H_z}{\partial x} \right) \quad (30)$$

Segundo Pozar (2005), ondas TEM (transversal eletro magnético) são caracterizadas por  $E_z = H_z = 0$ . Dessa forma, então os campos também são nulos e  $h^2 = 0$ .

Ondas TEM podem existir quando dois ou mais condutores estão presentes. Ondas planas também são exemplos de ondas TEM, desde que não haja componentes

de campo na direção da propagação. Com tais afirmações, um condutor fechado (como um guia de ondas retangular) não pode suportar ondas TEM.

A impedância de onda do modo TEM pode ser dada como na equação a seguir:

$$Z_{TEM} = \frac{E_x}{H_y} = \frac{\omega\mu}{\beta} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (31)$$

Outro par de campos transversos também pode ser dado por:

$$Z_{TEM} = \frac{-E_y}{H_x} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (32)$$

Combinando os resultados das Equações 31 e 32, tem-se uma expressão geral dos campos transversos:

$$\vec{H}(x, y) = \frac{1}{Z_{TEM}} \hat{z} \times \vec{E}(x, y) \quad (33)$$

Ondas transversais elétricas (TE) são caracterizadas por  $E_z = 0$  e  $H_z \neq 0$ . Aplicando tais condições às quatro Equações 27 a 30, tem-se:

$$H_x = -\frac{1}{h^2} \left( \gamma \frac{\partial H_z}{\partial x} \right) \quad (34)$$

$$H_y = -\frac{1}{h^2} \left( \gamma \frac{\partial H_z}{\partial y} \right) \quad (35)$$

$$E_x = -\frac{1}{h^2} \left( j\omega\epsilon \frac{\partial H_z}{\partial y} \right) \quad (36)$$

$$E_y = -\frac{1}{h^2} \left( j\omega\epsilon \frac{\partial H_z}{\partial x} \right) \quad (37)$$

Analogamente, com as ondas transversais magnéticas (TM), tendo  $E_z \neq 0$  e  $H_z = 0$ , voltando com essas condições às equações dos campos elétrico e magnético na direção de propagação  $z$ , têm-se (POZAR, 2005):

$$H_x = -\frac{1}{h^2} \left( j\omega\varepsilon \frac{\partial E_z}{\partial y} \right) \quad (38)$$

$$H_y = -\frac{1}{h^2} \left( j\omega\varepsilon \frac{\partial E_z}{\partial x} \right) \quad (39)$$

$$E_x = -\frac{1}{h^2} \left( \gamma \frac{\partial E_z}{\partial x} \right) \quad (40)$$

$$E_y = -\frac{1}{h^2} \left( \gamma \frac{\partial E_z}{\partial y} \right) \quad (41)$$

#### 4.2.2. Ondas planas no espaço livre e em dielétricos sem perdas

Define-se a propagação em espaço livre como aquela realizada no vácuo ou em uma atmosfera ideal, na ausência de qualquer objeto que provoque absorção ou reflexão dos sinais (ASSIS, 2012).

No caso de propagação de ondas planas no espaço livre, considera-se que a condutividade é nula e a permissividade e permeabilidade podem ser expressas simplesmente por:  $\varepsilon = \varepsilon_0$  e  $\mu = \mu_0$ . A constante de atenuação, nessas condições, é nula ( $\alpha = 0$ ) e a constante de propagação fica:

$$\beta = \omega\sqrt{\varepsilon_0\mu_0} = \omega/c \quad (42)$$

A velocidade de onda para essas condições pode ser expressa por  $u = 1/\sqrt{\mu_0\varepsilon_0} = c$ , velocidade da luz no vácuo, e o comprimento de onda por  $\lambda = 2\pi/\beta$ . A impedância intrínseca pode ser dada por  $\eta = \sqrt{\mu_0/\varepsilon_0} = 120\pi \approx 377\Omega$ .

Já num meio sem perdas (ou em dielétrico perfeito), a condutividade é quase nula, tendo-se, então,  $\sigma \ll \omega\varepsilon$ . Os termos de permissividade e permeabilidade nessas condições se expressam por:  $\varepsilon = \varepsilon_r\varepsilon_0$  e  $\mu = \mu_r\mu_0$ . Nessas condições a constante de atenuação fica nula ( $\alpha = 0$ ) e a constante de fase se reduz a:

$$\beta = \omega\sqrt{\mu\varepsilon} \quad (43)$$

A velocidade de onda para essas condições pode ser expressa por  $v = \omega/\beta$  e o comprimento de onda por  $\lambda = 2\pi/\beta$ . A impedância intrínseca pode ser dada por

$\eta = \sqrt{\mu/\varepsilon}$  com o campo elétrico e magnético em fase no tempo (SADIKU, 2012; EISENCRAFT, 2004).

### 4.2.3. Propagação da onda em meios com perdas

Sadiku (2012) afirma que um dielétrico com perdas é um meio parcialmente condutor (dielétrico imperfeito ou condutor perfeito) no qual  $\sigma \neq 0$ , ao contrário de um dielétrico sem perdas (dielétrico perfeito ou bom dielétrico), onde  $\sigma = 0$ .

Com as equações de Maxwell reescritas no domínio da frequência, as equações de campo elétrico e magnético são descritas como mostram as equações a seguir:

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0 \quad (44)$$

$$\nabla \cdot \vec{H} = 0 \quad (45)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -j\omega\mu\vec{H} \quad (46)$$

$$\nabla \times \vec{H} = (\sigma + j\omega\varepsilon)\vec{E} \quad (47)$$

Determinando o rotacional em ambos os lados da equação do rotacional do campo elétrico, tem-se:

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = -j\omega\mu (\nabla \times \vec{H}) \quad (48)$$

Aplicando a identidade vetorial:

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{A}) = \nabla(\nabla \cdot \vec{A}) - \nabla^2 \vec{A} \quad (49)$$

No lado esquerdo da equação, voltando com as Equações 44 e 47, pode-se obter:

$$\nabla (\nabla \times \vec{E}) - \nabla^2 \vec{E} = -j\omega\mu(\sigma + j\omega\varepsilon)\vec{E} \quad (50)$$

que fica:

$$\nabla^2 \vec{E} - \gamma^2 \vec{E} = 0 \quad (51)$$

de forma similar, para o campo H:

$$\nabla^2 \vec{H} - \gamma^2 \vec{H} = 0 \quad (52)$$

onde:

$$\gamma^2 = j\omega\mu(\sigma + j\omega\varepsilon) \quad (53)$$

As equações de campo elétrico e magnético são outra forma de escrever as equações de Helmholtz, ou simplesmente como equações vetoriais de onda. Em coordenadas cartesianas, cada equação corresponde a três equações de ondas escalares, uma para cada componente  $\vec{E}$  ou  $\vec{H}$  ao longo dos eixos x, y e z (SADIKU, 2012).

Como  $\gamma$  nas equações de campo elétrico e magnético é uma variável complexa, visto na Equação 19, as constantes  $\alpha$  e  $\beta$  podem ser obtidas aplicando a tal equação à Equação 51, obtendo-se:

$$-Re\gamma^2 = \beta^2 - \alpha^2 = \omega^2\mu\varepsilon \quad (54)$$

$$|\gamma^2| = \beta^2 + \alpha^2 = \omega\mu\sqrt{\sigma^2 + \omega^2\varepsilon^2} \quad (55)$$

A partir destas duas equações acima, Sadiku (2012) também segue afirmando que podem ser isolados os termos alfa e beta, tendo-se, dessa forma:

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu\varepsilon}{2} \left[ \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\mu\varepsilon}\right)^2} - 1 \right]} \quad (56)$$

$$\beta = \omega \sqrt{\frac{\mu\varepsilon}{2} \left[ \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\mu\varepsilon}\right)^2} + 1 \right]} \quad (57)$$

Por uma relação entre o módulo de densidade de corrente de condução e de densidade de corrente de deslocamento em um meio com perdas, é possível escrever a seguinte equação:

$$\frac{|J_{cs}|}{|J_{ds}|} = \frac{|\sigma E|}{|j\omega\epsilon E|} \Rightarrow \frac{\sigma}{\omega\epsilon} = tg\theta \quad (58)$$

onde  $tg\theta$  é conhecida como tangente de perdas, e  $\theta$  é o ângulo de perdas do meio.

Embora não haja uma fronteira bem determinada entre bons condutores dielétricos e com perdas,  $tg\theta$  ou  $\theta$  podem ser usados para quantificar as perdas em um meio (KRAUS; CARVER, 1973; SADIKU, 2012).

Outra forma que a tangente de perdas pode ser expressada é em termos da parte real ( $\epsilon'$ ) e imaginária da permissividade do material ( $\epsilon''$ ).

$$tg\theta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (59)$$

Segundo Hayt (2013), a propagação do campo eletromagnético em um meio é a função da permissividade elétrica ( $\epsilon$ ) e da permeabilidade magnética ( $\mu$ ) deste meio. Essas grandezas físicas podem ser ilustradas como descrevem as equações a seguir:

$$\epsilon_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' \quad (60)$$

$$\mu_r = \mu_r' - j\mu_r'' \quad (61)$$

onde:  $\epsilon_r$  é a permissividade complexa relativa;  $\epsilon_r'$  é componente real da permissividade relativa complexa;  $\epsilon_r''$  é a componente imaginária da permissividade relativa complexa;  $\mu_r$  é a permeabilidade complexa relativa;  $\mu_r'$  é a componente real da permeabilidade relativa complexa;  $\mu_r''$  é a componente imaginária da permeabilidade relativa complexa, onde estes termos são adimensionais.

Os valores de  $\epsilon_r$  e  $\mu_r$  são normalizados pelos valores da permissividade e da permeabilidade no espaço livre ( $\epsilon_0$  e  $\mu_0$ , respectivamente). As componentes reais das grandezas  $\epsilon_r'$  e  $\mu_r'$  estão relacionadas com a energia armazenada, enquanto a parte imaginária  $\epsilon_r''$  e  $\mu_r''$  estão relacionadas com as perdas (MARINHO, 2010).

As medidas das componentes complexas de permissividade são importantes para pesquisas das características eletromagnéticas de materiais e para possibilitar aplicações

científicas e industriais. Com conhecimento de tal parâmetro é possível inferir sobre as propriedades de absorção, além de se poder alterar a formulação do material para se obter o melhor desempenho (BALANIS, 1989; FAEZ; REZENDE; MARTIN, 2000). A componente real da permissividade complexa relativa ( $\epsilon_r'$ ) é medida como a energia do campo externo, que é armazenada no material. A componente imaginária da permissividade complexa relativa ( $\epsilon_r''$ ) é a medida da energia dissipada, sendo que,  $\epsilon_r''$  é sempre maior que zero, e é, geralmente, muito menor que ( $\epsilon_r'$ ) (EDMINISTER, 1980).

Sadiku (2012) também faz considerações para o caso de um dielétrico com perdas, onde tem-se que a condutividade é não-nula ( $\sigma/\omega\epsilon \ll 1$ ) e que os termos de permissividade e permeabilidade nessas condições se expressam por:  $\epsilon = \epsilon_r\epsilon_0$  e  $\mu = \mu_r\mu_0$ . Nessas condições, a constante de atenuação se reduz a  $\alpha = (\sigma/2) \cdot (\sqrt{\mu/\epsilon})$  e  $\beta = \omega\sqrt{\mu\epsilon}$ . A velocidade de onda, nesse caso, pode ser expressa por  $v = \omega/\beta$  e o comprimento de onda por  $\lambda = 2\pi/\beta$ .

A Figura 3 mostra como se comportam os campos elétrico e magnético na propagação em z em um meio com perdas:

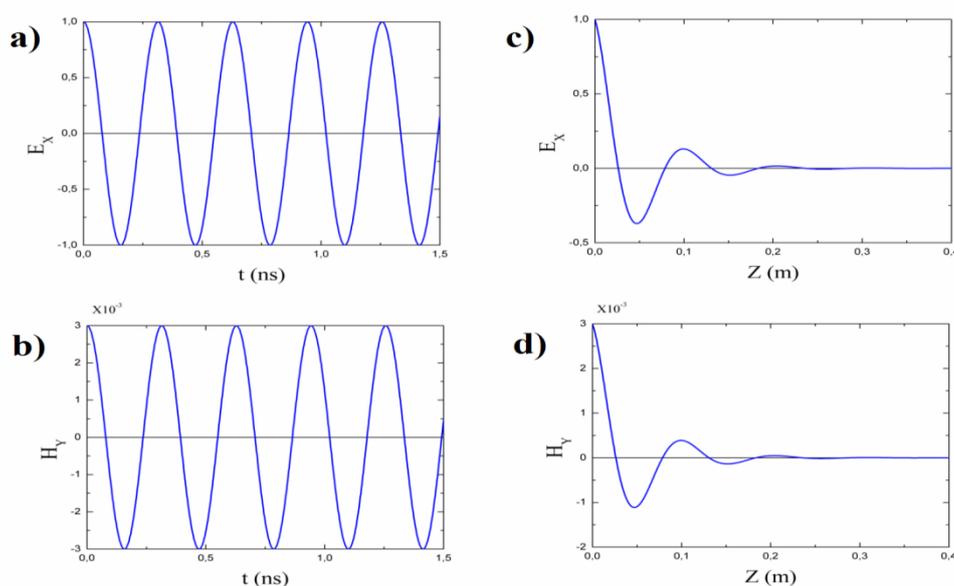


Figura 3: Curvas do campo elétrico e campo magnético de uma onda plana em meio com perdas. a) e b) mostram E e H em  $z = 0$  para todo t, respectivamente; c) e d) mostram E e H em  $t = 0$  para todo z, respectivamente. Os campos decaem enquanto se propagam em z.

Fonte: Adaptado de DARTORA, 2005.

A impedância de um meio com perdas é dada pela Equação 60, mostrada a seguir:

$$|\eta| = \frac{\sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}}{\left[1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}\right)^2\right]^{\frac{1}{4}}} \quad (62)$$

A impedância do meio é dada pela divisão de campo elétrico por campo magnético, a impedância intrínseca de um meio com perda pode ser dada pela relação de termos de características constitutivas do material, com a equação a seguir (SADIKU, 2012):

## 5. GUIAS DE ONDAS

Guias de onda são estruturas constituídas de um determinado material ao longo de um eixo  $z$ , que são caracterizados, basicamente, pelas grandezas de permissividade, permeabilidade e condutividade e são responsáveis por canalizar a energia eletromagnética que se propaga ao longo dos seus eixos. Essa energia eletromagnética canalizada serve para o transporte de informações de um ponto ao outro em um sistema de telecomunicações. E, para melhor eficiência do sistema, é desejável que o mínimo possível de energia seja absorvida pela estrutura do guia (VICENTE, 2004).

Os guias de onda não são tão utilizados, principalmente por oferecerem algumas dificuldades em relação a aspectos construtivos, como casos onde são necessárias curvas e torções, pois são de difícil realização, ou por requererem técnicas de corte e soldadura especializadas, bem como uma interface dispendiosa, e, além disso, o volume que ocupam é grande, em comparação a um cabo coaxial, também podem ter uma dispersão elevada (PINHO; ROCHA; FERREIRA, 2014).

Os guias de onda, apesar de certas limitações, são aplicados como uma alternativa à linha de transmissão de micro-ondas, sendo o elemento preferido para a transmissão e processamento de onda eletromagnéticas de frequência muito elevada. Os guias mais comuns são o retangular e o circular. Também são praticamente imbatíveis em outras aplicações, especialmente em casos onde há a implementação de filtros de baixas perdas e reduzida largura de banda, que são impossíveis de conseguir com parâmetros concentrados, ou linhas de microfita, em casos de implementação de componentes laboratoriais de elevado desempenho, como defasadores e atenuadores variáveis, e também em casos onde é necessário o transporte de sinal com baixa atenuação em sistemas que requerem elevada sensibilidade (PISSOLATO, 2012).

Pinho, Rocha e Ferreira (2014), afirmam que, embora um guia de onda possa propagar vários modos, na grande maioria dos casos, são utilizados para propagar apenas o modo fundamental, por exemplo,  $TE_{10}$  em guias de ondas retangulares. A propagação de mais de um modo dá origem aos seguintes problemas:

- Maior dispersão temporal na transmissão de informação (onde a velocidade da onda depende do modo), o que reduz a taxa de transmissão de informação.

- Dificuldade na coleta de potência que tenha sido transferida de um modo pretendido para outros modos, pois cada modo necessita de uma interface mecânica específica.

Os fatores que determinam a propagação de um determinado modo são, essencialmente:

- As dimensões do guia de onda, pois são propagáveis em todos os modos cujas frequências de corte seja inferior à frequência de operação.

- A forma, ou interface mecânica entre a fonte de sinal e o guia de onda, de excitação do guia de onda.

- Irregularidades no guia de onda (que fazem com que parte da energia do modo seja transferida para outros modos). A propagação apenas de um único modo é quase sempre desejável, de modo que as dimensões do guia de onda deverão permitir apenas a propagação do modo fundamental (PINHO; ROCHA; FERREIRA, 2014; PISSOLATO, 2012).

### 5.1. TIPOS DE GUIAS DE ONDA

Os formatos de guias de ondas podem ser diversos, dependendo da sua aplicação. São ilustradas na Figura 4 algumas das formas que um guia de ondas pode assumir, onde cada uma terá um determinado desempenho (VICENTE, 2004).



Figura 4: Fotografias de exemplares de seções de guia de ondas retangular e circular.

Fonte: MILLITECH, 2009.

Além desses tipos mais básicos de guia de onda, há formatos mais complexos, como, por exemplo, o guia torcido e o guia joelho ilustrados na Figura 5:



Figura 5: Ilustração de guias de ondas joelhos e guias de ondas com torções de 90°.

Fonte: MICROWAVETOWN, 2014.

Os guias de onda retangulares têm dimensões padronizadas, existindo três nomenclaturas: EIA (Electronics Industry Association - EUA), com designação WR, IEC (International Electrotechnical Commission - Europeia), com designação R, e a inglesa, com designação WG. Por exemplo, os guias de onda WR-75, R-120 e WG-17 representam o mesmo guia de onda nessas três nomenclaturas (PINHO; ROCHA; FERREIRA, 2014).

A Tabela 4 apresenta as características de alguns guias de onda retangulares padronizados, listando a designação em dois padrões (europeu e americano), a banda de operação e as dimensões do guia.

<b>WR (IEA)</b>	<b>WG (Europa)</b>	<b>Banda (GHz)</b>	<b>Dimensões (Pol.)</b>
2300		0.32 – 0,49	20.000 x 11.500
2100		0.35 – 0.53	21.000 x 10.500
1800		0.41 – 0.62	18.000 x 9.000
1500		0.49 – 0.75	15.000 x 7.500
1150		0.64 – 0.96	11.500 x 5.750
975		0.75 – 1.12	9.750 x 4.875
770		0.96 – 1.46	7.700 x 3.850
650	6	1.12 – 1.70	6.500 x 3.250
510		1.45 – 2.20	5.100 x 2.550
430	8	1.70 – 2.60	4.300 x 2.150
340	9A	2.20 – 3.30	3.400 x 1.700
284	10	2.60 – 3.95	2.840 x 1.340

229	11A	3.30 – 4.90	2.290 x 1.145
187	12	3.95 – 5.85	1.872 x 0.872
159	13	4.90 – 7.05	1.590 x 0.795
137	14	5.85 – 8.20	1.372 x 0.622
112	15	7.05 – 10.00	1.122 x 0.497
102		7.00 – 11.00	1.020 x 0.510
90	16	8.20 – 12.40	0.900 x 0.400
75	17	10.00 – 15.00	0.750 x 0.375
62	18	12.40 – 18.00	0.622 x 0.311
51	19	15.00 – 22.00	0.510 x 0.255
42	20	18.00 – 26.50	0.420 x 0.170
15	25	50.00 – 75.00	0.148 x 0.074
5	30	140.00 – 220.00	0.0510 x 0.0255

Tabela 4: Lista de guias de ondas retangulares.

Fonte: Adaptado de GABRIELLI, 2010.

## 5.2. EQUAÇÃO DE ONDA EM GUIA DE ONDA RETANGULAR

Considerando-se um guia de ondas retangular de largura  $a$ , altura  $b$  e comprimento infinito, representado na Figura 6, tendo-se  $a > b$ .

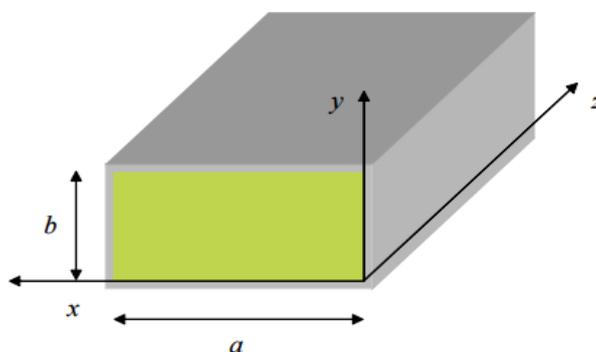


Figura 6: Ilustração do guia de onda retangular

Fonte: CARVALHO, 2015.

Para a determinação dos campos, deve-se proceder à resolução das Equações 21 e 22, respectivamente, para ondas TM e para ondas TE.

De acordo com Pinho, Rocha e Ferreira (2014) equação de onda permite a obtenção das componentes longitudinais  $E_z$  ou  $H_z$ , as Equações 22 e 23 têm a forma genérica apresentada na equação abaixo, onde  $\psi(x, y)$  é a função que se pretende determinar:  $E_z$  para os modos TM e  $H_z$  para os modos TE.

$$\nabla_{xy}^2 \psi + h^2 \psi = 0 \Leftrightarrow \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + h^2 \psi = 0 \quad (63)$$

Esta é uma equação em derivadas parciais que pode ser resolvida usando o método da separação de variáveis. Admitindo-se que  $\psi(x, y)$  seja dada pelo produto de uma função de  $x$  por outra função de  $y$ , isto é,  $\psi(x, y) = X(x)Y(y)$ , em que  $X(x)$  e  $Y(y)$  são funções a determinar. Substituindo, então, essa solução na equação citada acima, dividindo ambos os membros por  $\psi(x, y)$ , é obtida a equação a seguir:

$$\frac{1}{X(x)} \frac{\partial^2 X(x)}{\partial x^2} + \frac{1}{Y(y)} \frac{\partial^2 Y(y)}{\partial y^2} + h^2 = 0 \quad (64)$$

Analisando esta equação, é possível verificar que a primeira parcela depende apenas de  $x$ , enquanto a segunda é só função de  $y$ , enquanto a terceira é uma constante. Para que essa equação seja satisfeita para todos os valores de  $x$  e  $y$  ( $0 \leq x \leq a$ ) e ( $0 \leq y \leq b$ ), é necessário que as primeiras duas parcelas sejam constantes. Designando essas constantes por  $K_x^2$  e  $K_y^2$ , é possível escrever as equações a seguir:

$$\frac{1}{X(x)} \frac{\partial^2 X(x)}{\partial x^2} + K_x^2 = 0 \quad (65)$$

$$\frac{1}{Y(y)} \frac{\partial^2 Y(y)}{\partial y^2} + K_y^2 = 0 \quad (66)$$

$$K_x^2 + K_y^2 = h^2 \quad (67)$$

As duas primeiras dessas equações descritas, escritas de acordo com a terceira, são ambas equações diferenciais ordinárias lineares de segunda ordem e coeficientes constantes.

$$\frac{\partial^2 X(x)}{\partial x^2} + K_x^2 X(x) = 0 \quad (68)$$

$$\frac{\partial^2 Y(y)}{\partial y^2} + K_y^2 Y(y) = 0 \quad (69)$$

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

$$X(x) = A \operatorname{sen}(K_x x) + B \operatorname{cos}(K_x x) \quad (70)$$

$$Y(y) = C \operatorname{sen}(K_y y) + D \operatorname{cos}(K_y y) \quad (71)$$

Finalmente pode-se escrever a função  $\psi(x, y)$  em termos de A, B, C e D e  $K_x$  e  $K_y$  acordo com a equação a seguir:

$$\psi(x, y) = [A \operatorname{sen}(K_x x) + B \operatorname{cos}(K_x x)] \cdot [C \operatorname{sen}(K_y y) + D \operatorname{cos}(K_y y)] \quad (72)$$

### 5.2.1. Modos TM e TE em guia de onda retangular

Os modos TM possuem o campo  $E_z$  como única componente na direção de propagação ( $H_z = 0$ ). Por essa razão,  $E_z$  é a denominada componente longitudinal de suporte, uma vez que, a partir dela, podem ser obtidas as restantes componentes do campo eletromagnético (PISSOLATO, 2012; PINHO; ROCHA; FERREIRA, 2014).

Nesse caso, a solução da equação de onda é  $E_z(x, y) = \psi(x, y) = X(x)Y(y)$ , e as respectivas constantes de integração são determinadas usando as condições de contorno que implicam o anulamento do campo elétrico tangencial às paredes do guia, ou seja:  $E_y = E_z = 0$  em  $x = 0$  e  $E_x = E_z = 0$  em  $y = 0$  e  $y = b$ . Assim,  $E_z(x = 0, y) = E_z(x = a, y) = 0$  e  $E_z(x, y = 0) = E_z(x, y = b) = 0$  exige  $X(0) = X(a) = 0$  e  $Y(0) = Y(b) = 0$ . Utilizando essa informação na equação de  $\psi(x, y)$  em função das funções de integração A, B, C e D, são obtidas as seguintes equações:

$$B = 0 \quad (73)$$

$$A \operatorname{sen}(K_x a) = 0 \quad (74)$$

$$D = 0 \quad (75)$$

$$C \operatorname{sen}(K_y b) = 0 \quad (76)$$

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

$$K_x = \frac{m\pi}{a} \quad (77)$$

$$K_y = \frac{n\pi}{b} \quad (78)$$

$$X(x) = A \operatorname{sen}\left(\frac{m\pi}{a} x\right) \quad (79)$$

$$Y(y) = C \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi}{b} y\right) \quad (80)$$

As duas últimas Equações acima (77 e 78) permitem escrever a componente longitudinal do campo elétrico para o modo TM de acordo com a equação a seguir, em que  $E_{mn}$  representa a amplitude de  $E_z$  e  $\pi$ , a constante de propagação.

$$E_z = E_{mn} \operatorname{sen}\left(\frac{m\pi}{a} x\right) \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi}{b} y\right) e^{-\gamma z} \quad (81)$$

As componentes dos campos elétrico e magnético são obtidas, com  $H_z = 0$ , dando origem às equações a seguir:

$$H_x = \frac{j\omega\epsilon}{h^2} \frac{n\pi}{b} E_{mn} \operatorname{sen}\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-\gamma z} \quad (82)$$

$$H_x = -\frac{j\omega\epsilon}{h^2} \frac{n\pi}{a} E_{mn} \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-\gamma z} \quad (83)$$

$$E_x = -\frac{y}{h^2} \frac{m\pi}{a} E_{mn} \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-\gamma z} \quad (84)$$

$$E_y = -\frac{y}{h^2} \frac{m\pi}{b} E_{mn} \operatorname{sen}\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-\gamma z} \quad (85)$$

Nas equações, considerando-se que o valor característico h é dado pela Equação 65, que pode ser escrito de acordo com a equação a seguir:

$$h^2 = \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 \quad (86)$$

Os valores de  $m$  e  $n$  não devem ser nulos, ou seja, os modos TM exigem sempre  $m \geq 1$  e  $n \geq 1$ , caso contrário, a componente longitudinal de suporte será nula também. Um modo  $TM_{mn}$  fica completamente definido por dois índices inteiros ( $m$  e  $n$ ), e, da análise anterior, conclui-se que o modo  $TM_{11}$  é o primeiro modo dessa família.

Os modos TE são caracterizados por possuírem o campo  $H_z$  como única componente na direção de propagação ( $E_z = 0$ ). A componente longitudinal de suporte será considerada  $H_z$  (PINHO; ROCHA; FERREIRA, 2014).

A componente do campo magnético na direção de propagação  $H_z$  pode ser obtida a partir da resolução das equações de Helmholtz, com solução genérica dada pela Equação 70. Ao contrário dos modos TM, a determinação das constantes de integração para os modos TE não é imediata, já que as condições de contorno não podem ser aplicadas a  $H_z$ . As componentes transversais do campo elétrico  $E_x$  e  $E_y$  devem, primeiro, ser calculadas. Assim, considerando  $E_y = 0$ , são tidas as equações a seguir:

$$E_x = -\frac{j\omega\mu}{h^2} X(x)Y'(y) \quad (87)$$

$$E_y = -\frac{j\omega\mu}{h^2} X'(x)Y(y) \quad (88)$$

em que

$$X'(x) = K_x[A\cos(K_x x) - B\sin(K_x x)] \quad (89)$$

$$Y'(y) = K_y[C\cos(K_y y) - D\sin(K_y y)] \quad (90)$$

Dessa forma, agora, é possível a aplicação das condições de contorno, que são  $E_y(x=0, y) = E_y(x=a, y) = 0$  e  $E_x(x, y=0) = E_x(x, y=b) = 0$ . Utilizando essa informação nas expressões de  $X'(x)$  e  $Y'(y)$ , que foram indicados nas equações descritas acima (Equação 87 e 88), pode-se concluir que  $X'(0) = X'(a) = 0$  e que  $Y'(0) = Y'(b) = 0$ , de onde resultam as equações a seguir:

$$A = 0 \quad (91)$$

$$B \text{sen}(K_x a) = 0 \quad (92)$$

$$C = 0 \quad (93)$$

$$D \text{sen}(K_y b) = 0 \quad (94)$$

de forma (com m e n inteiros) que

$$K_x = \frac{m\pi}{a} \quad (95)$$

$$K_y = \frac{n\pi}{b} \quad (96)$$

$$X(x) = B \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \quad (97)$$

$$Y(y) = D \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \quad (98)$$

De acordo com as duas ultimas equações, é possível escrever a componente longitudinal do campo magnético para o modo TE de acordo com a equação a seguir, onde  $H_{mn}$  é a amplitude de  $H_z$ .

$$H_z = H_{mn} \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \quad (99)$$

O cálculo das componentes transversais dos campos elétrico e magnético, à semelhança do modo TM, com  $E_z = 0$ , são obtidas as equações abaixo:

$$H_x = \frac{\gamma}{h^2} \frac{m\pi}{a} H_{mn} \text{sen}\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-\gamma z} \quad (100)$$

$$H_y = \frac{\gamma}{h^2} \frac{n\pi}{b} H_{mn} \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \text{sen}\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-\gamma z} \quad (101)$$

$$E_x = \frac{j\omega\mu}{h^2} \frac{n\pi}{b} H_{mn} \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \text{sen}\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-\gamma z} \quad (102)$$

$$E_y = -\frac{j\omega\mu}{h^2} \frac{m\pi}{a} H_{mn} \text{sen}\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-\gamma z} \quad (103)$$

O valor característico h é dado, como nos modos TM, pela Equação 84 (PINHO; ROCHA; FERREIRA, 2014).

### 5.2.2. Frequência de corte

O conceito de frequência de corte é muito importante em guias de onda e define a frequência mínima a partir da qual um determinado modo pode ser propagado (PINHO; ROCHA; FERREIRA, 2014).

Satisfazendo a Equação 24, a constante de propagação  $\gamma$  pode ser calculada se for conhecida a frequência angular  $\omega$  e a constante  $h^2$  pela Equação 86, a qual é comum aos modos TE e TM. A constante de propagação é dada pela equação abaixo:

$$\gamma = \sqrt{h^2 - \omega^2 \mu \epsilon} \quad (104)$$

Para que um determinado modo (representado na expressão anterior pela constante  $h^2$ ) possa se propagar a uma frequência  $f$ , a constante de propagação, indicada em 19, deve assumir um valor imaginário ( $\gamma = j\beta_g$ ), ou seja,  $\omega^2 \mu \epsilon < h^2$ , então  $\gamma$  é real, e a constante de propagação é igual à constante de atenuação. A condição  $\omega^2 \mu \epsilon > h^2$  implica que sejam satisfeitas as equações a seguir:

$$\begin{aligned} 2\pi f \sqrt{\mu \epsilon} &> \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2} \\ f &> \frac{1}{2\sqrt{\mu \epsilon}} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2} \end{aligned} \quad (105)$$

A frequência limiar dada pela ultima dessas duas equações, é denominada frequência de corte  $f_c$ , que também pode ser dada pela equação abaixo:

$$f_c = \frac{v}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2} \quad (106)$$

em que  $v$  representa a velocidade de propagação em um meio ilimitado com o dielétrico do interior do guia de onda, sendo dada pela equação a seguir (no vácuo, a velocidade será a da luz  $c$ ):

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}} \quad (107)$$

A equação da frequência de corte também pode ser escrita de forma que facilite a ordenação dos modos pela respectiva frequência de corte, como mostrado abaixo:

$$f_c = \frac{v}{2a} \sqrt{m^2 + \left(\frac{a}{b}n\right)^2} \quad (108)$$

Sinais com frequências superiores à frequência de corte propagam-se no guia de onda, sendo comum nesses casos dizer que o guia de ondas é transparente. Sinais com frequência inferior são atenuados, e o guia de ondas é referido como opaco. Como conclusão é possível dizer que o guia de onda tem um comportamento semelhante a um filtro passa-altas (PINHO; ROCHA; FERREIRA, 2014).

Está mostrada na Figura 7 uma vista lateral do guia (plano xz) com as duas ondas TEM que se superpõem para formar a onda  $TE_{10}$ .

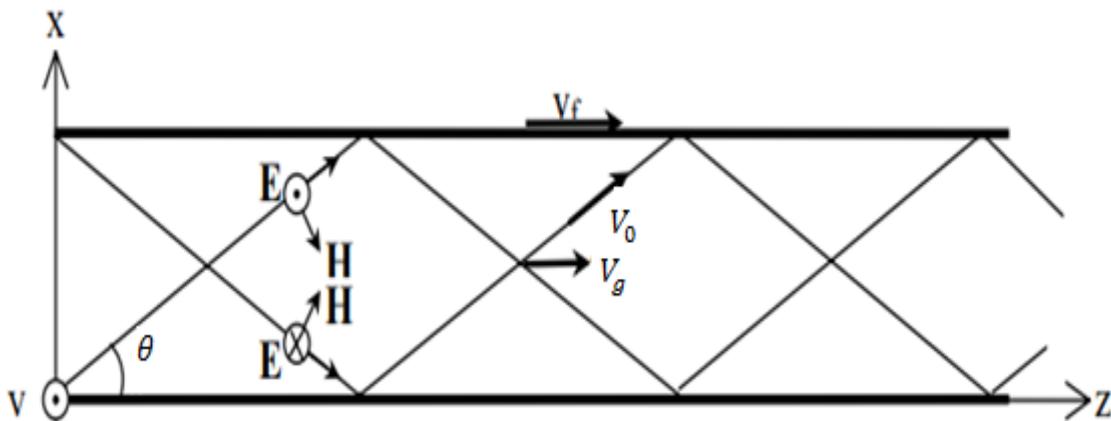


Figura 7: Ilustração da propagação de campos - vista lateral do guia.

Fonte: PANZO, 2014.

É mostrada na Figura 8 a variação do ângulo  $\theta$  em função da frequência.

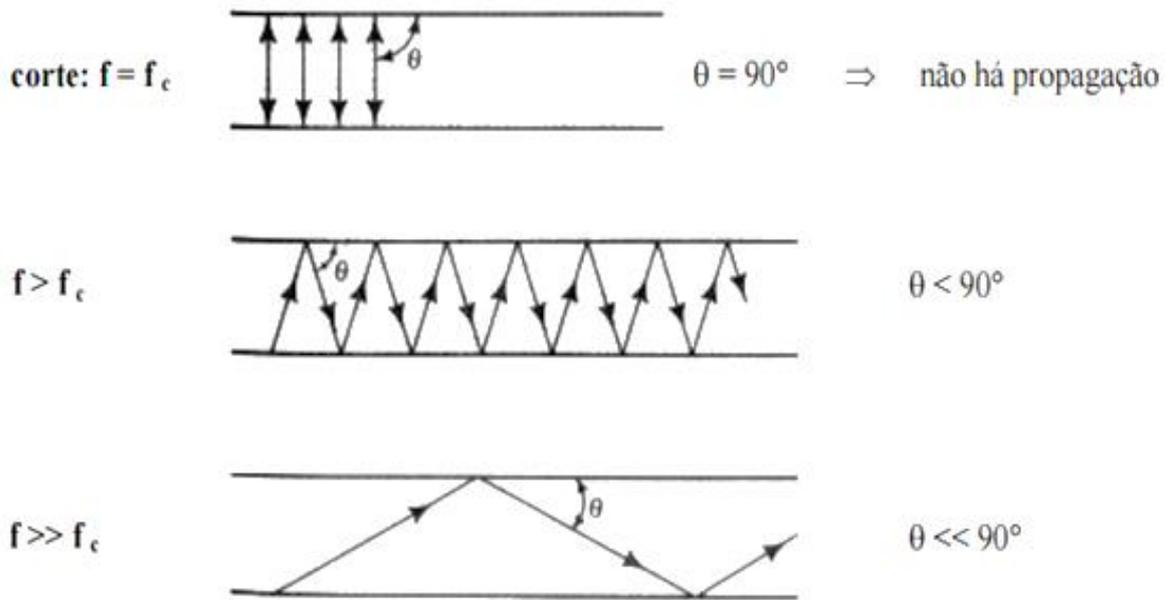


Figura 8: Esquema ilustrativo da propagação de onda com variação do ângulo  $\theta$  de acordo com aumento da frequência.

Fonte: PANZO, 2014.

É possível observar que, com  $\theta = 90$ , quando a frequência de operação é igual à de corte, as ondas TEM refletem-se perpendicularmente às paredes e não há propagação em  $z$ , tendo-se, portanto, uma onda estacionária entre as paredes e nenhuma energia é propagada. Para as frequências acima do corte, a energia pode se propagar ao longo do guia, e para frequências muito acima do corte, a propagação se aproxima das condições de propagação num meio ilimitado (PANZO, 2014).

Denomina-se o modo fundamental ou dominante o modo que apresenta a menor frequência de corte. O modo fundamental no guias de onda retangulares será o modo  $TE_{10}$  (tendo como convenção que  $a > b$ ), e a sua frequência de corte é dada pela equação simplificada a seguir:

$$f_c = \frac{v}{2a} \quad (109)$$

Em resumo, os modos  $TE_{mn}$  e  $TM_{mn}$  ficam completamente caracterizados com base nos parâmetros: Frequência de operação; Dimensão do guia; Características do dielétrico (PINHO; ROCHA; FERREIRA, 2014).

A Figura 9 mostra como se comportam as linhas de campo de diferentes perspectivas das seções do guia de onda retangular para o modo  $TE_{10}$ .

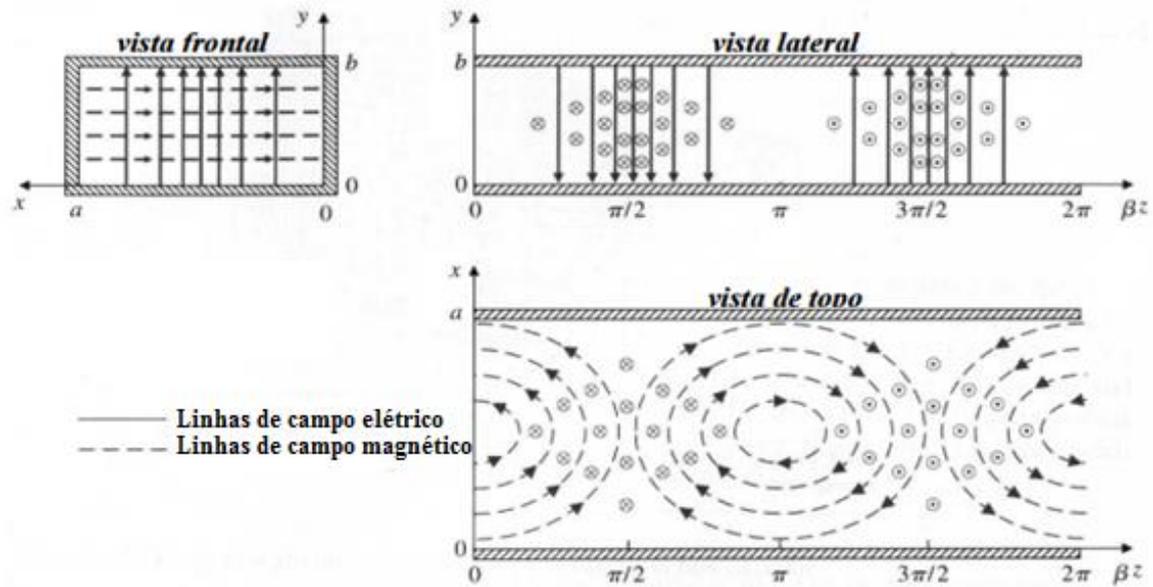


Figura 9: Ilustração das linhas de campo para modo  $TE_{10}$  em guia retangular.

Fonte: PANZO, 2014.

### 5.2.3. Parâmetros característicos dos modos

A seguir serão apresentados os parâmetros característicos de um modo em propagação no guia de onda: constante de fase  $\beta$ , comprimento de onda  $\lambda$ , velocidade de fase  $v$  e velocidade de grupo  $v_g$ .

- Constante de fase

Segundo Pinho, Rocha e Ferreira (2014), quando a frequência é superior à frequência de corte, pode-se escrever  $\lambda = j\beta_g$ , sendo  $\beta_g$  dado pela equação abaixo, com  $\beta = \omega\sqrt{\mu\epsilon}$  sendo a constante de fase de uma onda plana em um meio ilimitado com parâmetros construtivos ( $\mu\epsilon$ ).

$$\beta_g = \sqrt{\omega^2\mu\epsilon - h^2}$$

$$\beta_g = \omega\sqrt{\mu\epsilon} \sqrt{1 - \frac{h^2}{\omega^2\mu\epsilon}}$$

$$\beta_g = \beta \sqrt{1 - \frac{h^2}{\omega^2 \mu \epsilon}} \quad (110)$$

Fazendo, agora, a substituição de  $h^2$  pela Equação 84, é possível reescrever a equação acima em termos da frequência de corte, como pode-se ver a seguir:

$$\beta_g = \beta \sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2} \quad (111)$$

- Comprimento de onda

Atendendo à relação que diz que  $\lambda_g = 2\pi/\beta_g$ , o comprimento de onda no guia é dado pela equação abaixo, com o comprimento de onda num meio ilimitado com o dielétrico que preenche o guia de onda.

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}} \quad (112)$$

A equação descrita acima permite concluir que o comprimento de onda de um modo de propagação em um guia de onda é maior do que o comprimento de onda em um meio ilimitado com as mesmas características do dielétrico do guia ( $\lambda_g > \lambda$ ).

Além do conceito de frequência de corte, muito comum em guias de onda, outro conceito também muito utilizado é o de comprimento de onda de corte. O comprimento de onda de onda no meio ilimitado calculado na frequência de corte, ou seja, pela definição,  $\lambda_c = v/f_c$ , conduzindo à equação abaixo:

$$\lambda_c = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}} \quad (113)$$

O maior comprimento de onda de corte correspondente ao modo  $TE_{10}$ , sendo  $\lambda_c = 2a$ . Portanto, uma onda com comprimento de onda menor que o dobro da maior

dimensão do guia de onda retangular (2a) poderá propagar-se no guia (PINHO; ROCHA; FERREIRA, 2014; PANZO, 2014).

- Velocidade de fase

Atendendo à definição dada por  $v_f = \omega/\beta$ , é possível determinar a velocidade de fase, obtendo a equação a seguir, em que, com a expressão, é tida a velocidade de fase em um meio ilimitado (PANZO, 2014).

$$v_f = \frac{v}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}} \quad (114)$$

- Velocidade de grupo

Como o guia é dispersivo ( $\beta$  não é diretamente proporcional à frequência), a velocidade a que a informação se desloca é denominada velocidade de grupo. Esta é definida de acordo com a equação abaixo:

$$v_g = \frac{1}{\frac{d}{d\omega} \left[ \beta \sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2} \right]}$$

$$v_g = v \sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2} \quad (115)$$

Quando a frequência é aumentada, as características de propagação tendem para as de propagação em meio ilimitado, ou, de outra forma, o comprimento de onda se torna tão pequeno que o guia se apresenta como um meio ilimitado (PINHO; ROCHA; FERREIRA, 2014).

### 5.3. ATENUAÇÃO EM GUIA DE ONDA RETANGULAR

Há dois fatores que contribuem para as perdas de propagação nos guias de onda, à semelhança de cabos coaxiais: um se deve às perdas de Joule (na parede condutora), e outro, às perdas no dielétrico. Se as contribuições forem suficientemente reduzidas, a constante de atenuação total  $\alpha$  (Np) é dada pela equação abaixo, onde:

$$\alpha = \alpha_c + \alpha_d \quad (116)$$

onde  $\alpha_c$  é a constante de atenuação devido às perdas no condutor e  $\alpha_d$  é a constante de atenuação devido às perdas no dielétrico (PINHO; ROCHA; FERREIRA, 2014).

As perdas na parede condutora devem-se à dissipação ôhmica nas paredes metálicas do guia de onda causadas por correntes superficiais que sustentam a propagação do modo. As perdas no dielétrico estão associadas a um fenômeno de alinhamento e realinhamento de moléculas polares no dielétrico causadas pelo campo alternado (PISSOLATO, 2012).

Segundo Costa (2013), com frequências acima da frequência de corte ( $f > f_c$ ), para qualquer modo, o valor de  $\alpha_d$  é determinado pela equação abaixo:

$$\alpha_d = \frac{\sigma_d \eta_d}{2\sqrt{1 - (f_c/f)^2}} \quad (117)$$

Ainda com frequências acima da frequência de corte, para o modo  $TE_{10}$ ,  $\alpha_c$  é dada por:

$$\alpha_c = \frac{2}{b\sigma_c\delta\eta_d\sqrt{1 - (f_c/f)^2}} \left[ \frac{1}{2} + \frac{b}{a} \left( \frac{f_c}{f} \right)^2 \right] \quad (118)$$

onde  $\delta$  é a profundidade peculiar nas paredes do guia, expresso por  $\delta = 1/\sqrt{\pi f \mu \sigma_c}$ .

No caso de frequências abaixo do corte ( $f < f_c$ ), a atenuação para qualquer modo pode ser obtida a partir de:

$$\alpha = \gamma = \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 - \omega^2\mu\varepsilon} \quad (119)$$

A constante de atenuação é dada por uma relação dos modos de propagação, das dimensões do guia retangular, da frequência angular de onda e das constantes constitutivas do material.

## 6. MATERIAIS ABSORVEDORES DE RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA

Com o grande avanço em sistemas de comunicação wireless, os absorvedores e as ondas eletromagnéticas têm se tornado cada vez mais importante em aplicações civis e militares (ZHANG et al., 2006).

Os materiais absorvedores de radiação eletromagnética (MARE) são aplicados com o objetivo de eliminar ou atenuar os níveis de radiação eletromagnética em diferentes ambientes, e tem ocorrido uma grande expansão no desenvolvimento desses materiais, que possuem a característica de absorver a radiação incidente transformando-a, principalmente, em energia térmica (FOLGUEIRAS; REZENDE, 2005).

Os MARE pertencem a uma classe que é chamada de materiais compósitos. De forma geral, compósitos são quaisquer materiais constituídos de várias fases, que exibem uma proporção significativa das propriedades de ambas as fases que o constituem, de tal modo que é obtida uma melhor combinação de propriedades.

Há uma grande variedade de compósitos que ocorre na natureza, tais como a madeira, que consiste de celulose em forma de fibras ocas, o que garante alta rigidez, envolvidas e unidas por lignocelulose, o que garante ductilidade, e como os ossos, que são compósitos constituídos pela proteína conhecida por colágeno e pelo mineral apatita, que garantem, respectivamente, ductilidade e alta rigidez. Em engenharia, quando do projeto de materiais compósitos artificiais, combinam-se metais, cerâmicas e polímeros para produzir uma nova geração de materiais com extraordinárias características, quase sempre criada para melhorar combinações de características mecânicas, tais como a rigidez, tenacidade e resistência nas condições ambientes e altas temperaturas (CALLISTER; RETHWISCH, 2013).

### 6.1. ESTADO DA ARTE SOBRE MATERIAIS ABSORVEDORES

Desde meados do século passado, os MARE têm sido utilizados na absorção da energia da onda eletromagnética em diversas aplicações, principalmente nas áreas de telecomunicações e militar. Uma aplicação que ganhou notoriedade a partir da década de 1960 foi sua utilização em estruturas militares, com o objetivo de tornarem essas estruturas menos reflexivas ao sinal de radar (LEE, 1991).

Esses RAM (*Radar absorbent material*) são aplicados de modo a promover a redução da assinatura radar (*Radar Cross Section* – RCS) de veículos aéreos, uma vez

que a radiação emitida não retorna à antena receptora e impede a detecção da aeronave (REJAS, 2014).

Os materiais absorvedores de radiação eletromagnética reduzem o sinal refletido absorvendo parte da radiação incidente. Cerca de 90-95% da energia de micro-onda ou radiofrequência (RF) incidente é convertida em calor com pouco aumento da temperatura, pois a energia envolvida é muito pequena. As capacidades de absorção variam de material para material (ARMAS, 2003).

Estes materiais também são incorporados em camuflagens de estruturas em solo, no gerenciamento da assinatura em frequências de mapeamento topográfico por radares aéreo-embarcados e satélites (radares de abertura sintética – *Synthetic Aperture Radar/SAR*). Na Figura 10 é mostrada uma fotografia obtida por radar de imageamento em alta frequência (30GHz) de um carro de combate sem e com recobrimento MARE (SAAB, 2005).

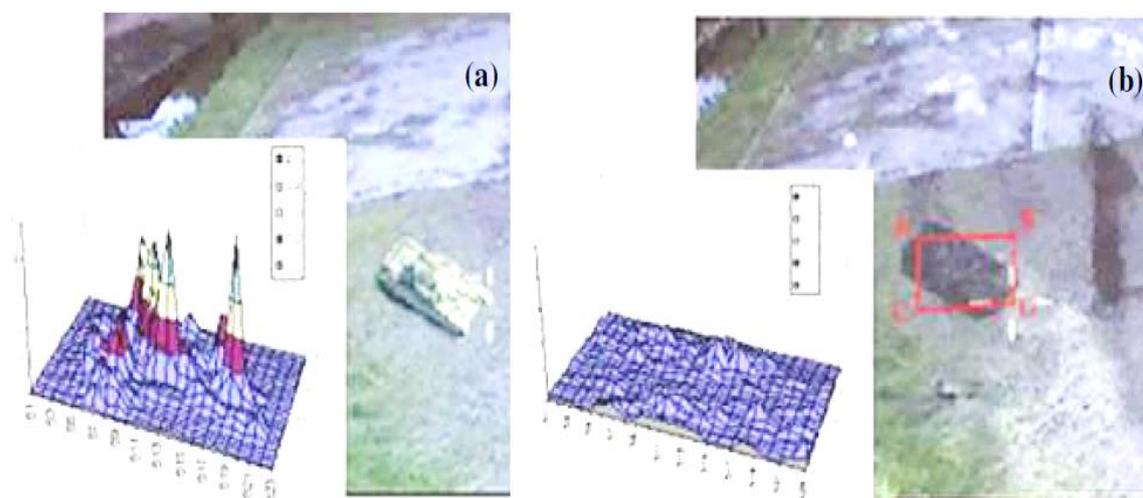


Figura 10: Imagem de um carro de combate obtida por radar de imageamento em 30GHz. (a) Sem recobrimento MARE. (b) Com recobrimento MARE.

Fonte: SAAB, 2005.

No panorama nacional, o estudo e o desenvolvimento de MARE no Brasil ainda são considerados incipientes. É possível notar esta situação avaliando-se o baixo número de material bibliográfico nacional disponível referente ao assunto, sejam impressos ou por meio eletrônico (QUADROS, 2014).

Em relação a trabalhos que fazem estudos sobre materiais absorvedores no Brasil, o Instituto de Tecnologia Aeronáutica em parceria com a Universidade de

Taubaté é um dos grandes fornecedores de recursos para subsidiar o desenvolvimento desse tipo de materiais, como por exemplo, um trabalho que estuda o processamento de material absorvedor a partir da impregnação de tecido de fibra de vidro com polímero condutor (FOLGUEIRAS; REZENDE, 2006). Trabalhos de caracterização de materiais absorvedores via medidas de permissividade e permeabilidade em determinadas bandas também são desenvolvidos por tal parceria (PEREIRA, 2007; SFALSIN, 2008). Ainda dessa parceria, também são desenvolvidos materiais absorvedores para fins de aplicação em setor militar e aeronáutico (DIAS; SILVA; REZENDE, 2000).

No caso de desenvolvimentos de estudos internacionais, são feitos trabalhos de caracterização de diferentes compostos químicos, de processamentos inovadores, ou materiais abundantes em determinadas regiões e são avaliados os seus potenciais de uso para absorção de radiação eletromagnética (KIM; KIM, 2002; SALLEH; YAHYA; AWANG, 2011; SHIN; OH, 1993; ZHANG et al., 2006).

Segundo o Centro de Gestão e Estudos Estratégicos - CGEE (2010), no Brasil não são produzidos materiais do tipo MARE em escala industrial, apesar de haver mercado potencial para tal. É citado, por exemplo, o caso dos aparelhos celulares que vem sendo crescentemente comercializados, como pode ser visto em números: só no ano de 2008 foram vendidos 30 milhões de aparelhos. Além disso, o emprego deste tipo de material poderia ser estendido para os mercados automotivo, eletrônico, militar, médico, entre outros. Em seu relatório, nas perspectivas para uso de materiais absorvedores, o CGEE faz a proposta de que sejam industrializadas as soluções nacionais já desenvolvidas, em nível de protótipo pelos órgãos de pesquisa nacionais, gerando assim inovação de modo a atender as demandas civis e militares.

A avaliação das propriedades eletromagnéticas dos materiais, tais como refletividade e a absorção de ondas eletromagnéticas, deve ser realizada em um meio ambiente livre de interferências eletromagnéticas externas, de modo que forneça resultados confiáveis das propriedades medidas. O meio ambiente desenvolvido com este objetivo é a câmara anecóica, que tem por finalidade a simulação de um ambiente de teste equivalente ao espaço livre, imune a reflexões, para assegurar a uniformidade em amplitude e fase do sinal incidente na região que contém o dispositivo em teste.. Essa é uma das principais aplicações de materiais absorvedores, onde são posicionados em todas as superfícies do ambiente, onde atuarão reduzindo as reflexões indesejáveis, como ecos, no interior da câmara (SFALSIN, 2008).

É mostrada na Figura 11 a fotografia de uma câmara anecóica blindada que opera na faixa de frequências compreendida entre 28 MHz e 2GHz, com atenuação de sinal no interior da câmara de 100 dB (99,9999999%) (LEHMAN, 2008).



Figura 11: Fotografia de uma câmara anecóica para operação na faixa de frequências de 28MHz a 2GHz.

Fonte: LEHMAN, 2008

Câmaras anecóicas de grande porte também são utilizadas para estudos de compatibilidade e interferência eletromagnética (EMI/EMC – *Electromagnetic Interference/Electromagnetic Compatibility*), coeficiente de reflexão, entre outros, de objetos reais de grande escala, como automóveis, helicópteros, satélites e aviões, como mostrado na Figura 12 (SFALSIN, 2008).

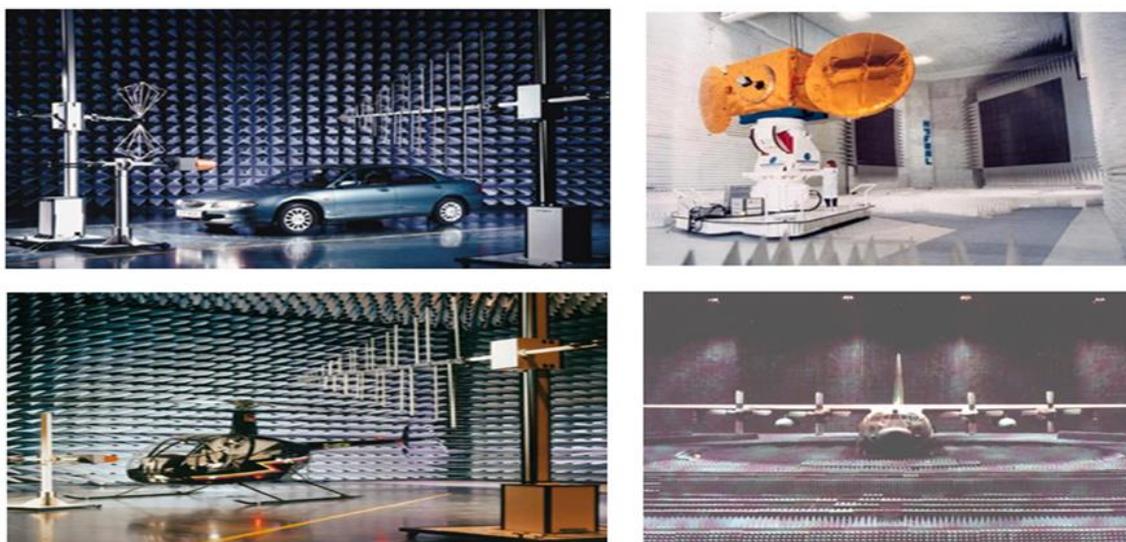


Figura 12: Fotografias de objetos no interior de câmaras anecóicas para avaliação de compatibilidade eletromagnética.

Fonte: Adaptado de SFALSIN, 2008.

Em relação a aplicações civis, a utilização bem sucedida de materiais absorvedores de radiação eletromagnética é evidenciada na blindagem eletromagnética de instrumentos, na fabricação de artefatos utilizados na área de telecomunicações, na indústria de eletroeletrônicos e na área médica (DIAS et al., 2005).

A ampla utilização desses materiais é relacionada com a solução de problemas de incompatibilidade e interferência eletromagnéticas. Nesse contexto, todo componente eletrônico que apresente comportamento anômalo quando incidido por radiação eletromagnética justifica a utilização de MARE para sua devida proteção e garantia dos padrões operacionais (QUADROS, 2014).

## 6.2. TIPOS DE MATERIAIS ABSORVEDORES

Os Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética (MARE), em geral, são constituídos de materiais dielétricos e/ou magnéticos, que, quando processados de maneira conveniente, promovem alta perda de energia em determinadas faixas de frequências (DIAS et al., 2005).

Essencialmente, existem três técnicas de construção de absorvedores de radiação eletromagnética, baseadas em: cancelamento de fases da onda eletromagnética incidente, espalhamento da onda eletromagnética incidente em direções diferentes da antena receptora, e utilização de materiais com perdas magnéticas e dielétricas intrínsecas dentro da faixa de frequências de interesse (FOLGUEIRAS; REZENDE, 2005).

Os absorventes baseados em carbono são chamados MARE dielétricos. Adicionando produtos de carbono em um material isolante é possível aumentar a resistência elétrica e mudar as propriedades elétricas. Os exemplos mais comuns são as pirâmides encontradas em câmaras anecóicas. Os MARE dielétricos são grandes, frágeis e não podem ser usados onde há pouco espaço e muita vibração mecânica (SFALSIN, 2008).

O MARE magnético usa derivados do ferro como o ferro carbônico e óxido de ferro chamados de ferrites. O ferro dissipa as ondas de radar na forma de calor e pode ser usado em tintas. Eles são agrupados em esferas que se comportam como ineficientes antenas de rádio, absorvendo ondas de rádio e dissipando a energia antes de refletir. A energia é absorvida pelos elétrons da cobertura magnética. Em um bom condutor como

as antenas de metal, os elétrons podem se mover livremente e as ondas de rádio são retransmitidas. As esferas cobertas de ferrite são más condutoras e o movimento de elétrons é amortecido pela resistência elétrica do material. O MARE magnético tende a ser pesado e a oxidar, diminuindo a eficiência que piora ainda mais com calor e é ruim para aeronaves supersônicas que esquentam muito a superfície (SILVA, 2008).

Em relação às perspectivas para o desenvolvimento desses materiais, a tendência atual é de serem desenvolvidos materiais mais leves, baratos, e que absorvam grandes faixas no espectro. Esses materiais podem ter melhorado em cerca de dez vezes desde o meio da década de 80. O MARE perfeito deve cobrir grande banda, ser fino, durável e barato para a grande maioria de suas aplicações (ARMAS, 2003).

O que vai determinar o tipo de aditivo a ser utilizado na elaboração de um MARE é a intensidade que se pretende absorver ou atenuar o sinal da onda, a faixa de frequência da onda eletromagnética que se pretende trabalhar, além de aspectos estruturais de aplicação do MARE, tais como resistência mecânica, térmica, e às intempéries, flexibilidade, resistência a altas temperaturas, entre outras (SIMÕES, 2005).

### 6.3. PARÂMETROS DE MATERIAIS ABSORVEDORES

Segundo Sfalsin (2008), o desenvolvimento de pesquisas na área de MARE envolve um estudo multidisciplinar, englobando as áreas de química, física, eletrônica, telecomunicações, entre outras. Alguns dos parâmetros de estudo na área de MARE envolvem:

- Faixa de frequências de operação;
- Nível exigido de absorção;
- Temperatura máxima de estabilidade magnética;
- Resistência ao meio ambiente: ultravioleta, luz solar visível, infravermelho, umidade, chuva, entre outros;
- Resistência a ciclos térmicos;
- Propriedades mecânicas como rigidez, elasticidade, entre outras;
- Aplicabilidade em estruturas com geometrias simples e complexas.

As principais propriedades eletromagnéticas a serem observadas no MARE são: permissividade elétrica, permeabilidade magnética, tangente de perda, impedância (SIMÕES, 2005).

Os métodos de caracterização eletromagnética desses materiais envolvem, fundamentalmente, três variáveis, relacionadas com a interação da onda eletromagnética com o material. De acordo com a equação abaixo, a onda eletromagnética com energia  $E_i$  incide no material e sua energia pode ser totalmente ou parcialmente refletida ( $E_r$ ), atenuada devido ao material ( $E_a$ ), ou transmitida, isto é, que passa através da estrutura do material sem ser absorvida ou refletida ( $E_t$ ). Na Figura 12 são ilustrados os caminhos da energia da onda eletromagnética sobre um material (SFALSIN, 2008).

$$E_i = E_r + E_a + E_t + E_d \quad (120)$$

onde:  $E_i$  é a energia incidente;  $E_r$  é a energia refletida;  $E_a$  é a energia atenuada;  $E_t$  é a energia transmitida;  $E_d$  é a energia dissipada devido à atenuação do espaço livre.

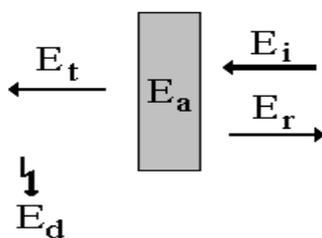


Figura 13: Ilustração de um esquema geral dos possíveis caminhos da energia da onda eletromagnética incidente sobre um determinado material.

Fonte: SFALSIN, 2008.

Analisando-se um material absorvedor de radiação eletromagnética, tem-se que, quanto maior é a componente imaginária da permissividade complexa, maiores são as perdas impostas à onda incidente. O sinal negativo da permissividade complexa ( $\epsilon_r' - \epsilon_r''$ ) significa que o meio é dissipativo (FAEZ; REZENDE; MARTIN, 2000).

Por definição, os valores reais de permissividade relativa e permeabilidade relativa são sempre maiores que um. Um material que possui zero de perda dielétrica apresenta valores dos parâmetros complexos de permissividade  $\epsilon_r' = 1$  e  $\epsilon_r'' = 0$ , ou seja, não armazena energia e, conseqüentemente, não apresenta perdas. O mesmo é válido para permeabilidade, um material com zero de perdas magnéticas  $\mu_r' = 1$  e  $\mu_r'' = 0$  (SILVA, 2014).

Em materiais absorvedores de radiação eletromagnética, a condutividade elétrica e a permissividade complexa não são constantes em toda a faixa de frequências. Esses

parâmetros podem mudar com a frequência, temperatura, formulação, pressão e estrutura molecular dos materiais (PEREIRA, 2007).

Segundo Shin e OH(1993), tendo como base a equação para o absorvedor para condição de reflexão nula, como mostrado na equação adiante:

$$Z = 1 = \sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}} \operatorname{tgh} \left[ \left( \frac{2\pi}{c} \right) \sqrt{\mu_r \cdot \varepsilon_r} f \cdot d \right] \quad (121)$$

com  $\mu_r$  sendo a permeabilidade complexa ( $\mu'_r - j\mu''_r$ ),  $\varepsilon_r$  permeabilidade relativa complexa ( $\varepsilon'_r - j\varepsilon''_r$ ), c velocidade da luz, f frequência e d a espessura do absorvedor.

A perda de retorno é uma função da normalização da impedância de entrada na superfície do absorvedor:

$$\text{Perda de retorno(dB)} = 20 \log \left| \frac{(Z - 1)}{(Z + 1)} \right| \quad (122)$$

De acordo com Salleh et al.(2011), o termo da tangente hiperbólica mostrado na equação da impedância, nada mais é que a  $\operatorname{tanh}(\gamma t)$  onde  $\gamma$  pode ser expressado pela equação a seguir:

$$\gamma = \alpha + j\beta = j \frac{2\pi f}{c} \sqrt{\mu_r \varepsilon_r} = j \frac{2\pi f}{c} \sqrt{(\mu'_r - j\mu''_r)(\varepsilon'_r - j\varepsilon''_r)} \quad (123)$$

Além das perdas dielétricas e magnéticas, como mostrado nas equações anteriores, a impedância característica tem valor variável de forma que, com permissividade muito alta, existe uma desvantagem relativa ao casamento de impedância, resultando em pouca reflexão (WANG et. al., 2011).

A eficiência de um material absorvedor pode se dar pela atenuação de sinal refletido, que pode ser relacionado com a porcentagem de absorção do sinal de radiação, valores mostrados da Tabela 5:

<b>Atenuação da reflexão, dB</b>	<b>% da energia absorvida</b>
0	0
-1	20.5
-2	36.9
-3	50
-5	68.3
-10	90
-15	96.9
-20	99
-30	99.9
-40	99.99

Tabela 5: Valores de atenuação (dB) e porcentagem de energia absorvida no material

Fonte: Adaptado de LEE, 1991 apud. FERREIRA, 2011.

## 7. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a confecção de corpos de prova de pentóxido de nióbio, visando a obtenção de valores crescentes de características eletromagnéticas – por variáveis de tangente de perdas e permissividade elétrica –, para estudos comparativos, o material foi dopado com molibdênio e sinterizado em forno mufla e em forno de micro-ondas.

As confecções dos corpos de prova e caracterizações dos mesmos estão ilustradas de acordo com o fluxograma da Figura 14:

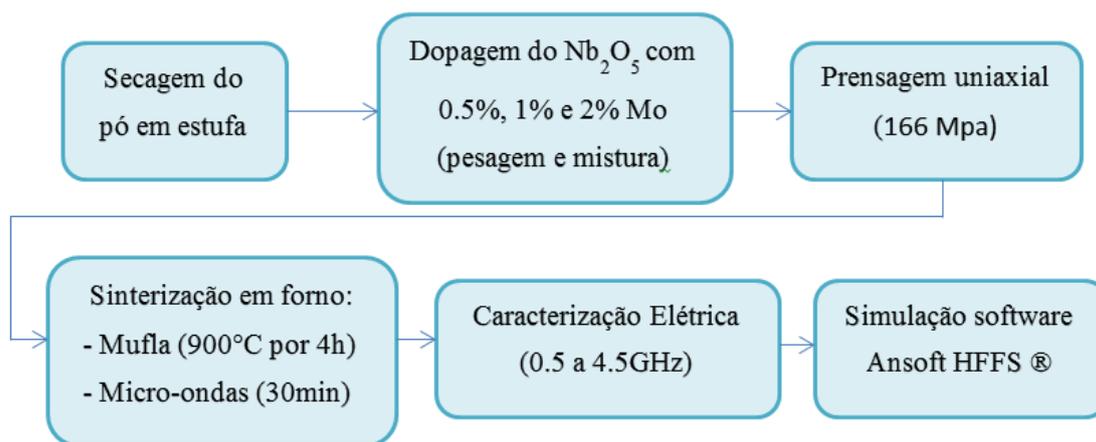


Figura 14: Fluxograma de preparação dos corpos de prova e etapas de verificação de eficiência do material para aplicação como material absorvedor de micro-ondas.

Fonte: Autoria própria, 2016.

Além das etapas descritas no fluxograma, também foram feitas análises de composições dos materiais em equipamentos de EDX (espectrômetro de difração de raios-X) e DRX (difratômetro de raios X) antes e depois das sinterizações e análises das superfícies dos corpos de prova em MEV (microscópio de varredura eletrônica).

### 7.1. SECAGEM DOS PÓS

Inicialmente foi importante ser feita a colocação dos pós em estufa, mostrada na Figura 15, marca nova ética, modelo 404/3D e de temperatura nominal máxima de 140°C, para a minimização da presença de umidade, a temperatura utilizada, para tal finalidade, foi de 110°C.



Figura 15: Fotografia de estufa usada na secagem dos pós.

Fonte: Autoria própria, 2015.

## 7.2. DOPAGEM DO PENTÓXIDO DE NIÓBIO COM MOLIBDÊNIO

Para composição das amostras nos percentuais de dopagem de nióbio e molibdênio desejados, o material foi pesado numa balança modelo AY220, mostrada na Figura 16, de resolução 0.001g, marca Shimadzu.



Figura 16: Fotografia de balança de precisão.

Fonte: Autoria própria, 2015.

As porcentagens em massa de dopagem do pentóxido de nióbio com molibdênio dos pós adicionados foram de 0.5%, 1% e 2% de molibdênio.

### 7.3. PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

A mistura do pentóxido de nióbio com molibdênio foi feita, inicialmente, em um recipiente esférico, onde foram postas as determinadas quantidades de cada componente, e, depois, em um torno mecânico – em sua velocidade mínima de rotação (30rpm) – por três horas. O torno mecânico utilizado foi de marca Nardini, mostrado na Figura 17, modelo Nodus 220 Gold.



Figura 17: Fotografia de torno mecânico usado para a mistura dos pós.

Fonte: Autoria própria, 2015.

Após a mistura, foi realizada a compactação dos corpos de prova em uma prensa hidráulica. Os corpos e prova possuem dimensões de 7mm de altura por 15mm de diâmetro. A prensa hidráulica usada para a etapa de compactação uniaxial é de marca TIL Marcon, mostrada na Figura 18, com capacidade máxima de dez toneladas.



Figura 18: Fotografia de prensa hidráulica.

Fonte: Autoria própria, 2015.

Já a temperatura de sinterização no forno mufla usada foi de 900°C. O forno usado é da EDG Equipamentos, mostrado na Figura 19, modelo 3P-S 3000.



Figura 19: Fotografia de forno tipo mufla.

Fonte: Autoria própria, 2015.

A parte de sinterização por micro-ondas foi realizada em um forno de micro-ondas convencional, de marca Panasonic, mostrado na Figura 20, modelo ST652W, cuja frequência de operação é de 2.45GHz e 900W de potência.



Figura 20: Fotografia de forno de micro-ondas convencional.

Fonte: Autoria própria, 2015.

#### 7.4. ANÁLISE DE COMPOSIÇÕES EM EQUIPAMENTO DE EDX

Foram feitas as análises das composições do material antes e depois da sinterização. O equipamento utilizado foi o espectrômetro de fluorescência de raios-X (EDX), da marca Shimadzu, mostrado na Figura 21 modelo EDX-7000.

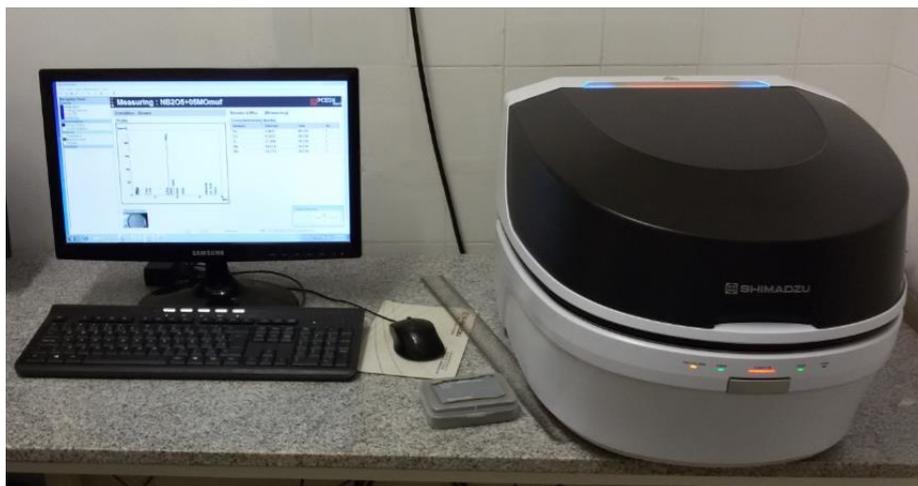


Figura 21: Fotografia de equipamento de EDX.

Fonte: Autoria própria, 2015.

Para análises das fases e da existência da dopagem do material, foi usado o equipamento de difração de raios-X (DRX) da Shimadzu, mostrado na figura 22, modelo XRC-6000.



Figura 22: Fotografia de equipamento de difratometria de raios-X.

Fonte: Autoria própria, 2015.

#### 7.5. ANÁLISE DE HOMOGENIDADE DAS SUPERFÍCIES DOS CORPOS DE PROVA EM MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA (MEV)

Para a análise de homogeneidade e de distribuição de agente dopante na superfície foi usado um microscópio eletrônico de varredura (MEV) de marca TESCAN, mostrado na Figura 23, modelo Veja 3LMU. Na Figura 24 é mostrado como o material foi colocado nos compartimentos do equipamento para análise.



Figura 23: Fotografia de microscópio eletrônico de varredura.

Fonte: Autoria própria, 2015.



Figura 24: Fotografia de pós colocados em superfícies para análise no MEV.

Fonte: A autoria própria, 2015.

Para uma melhoria da qualidade das imagens obtidas, é usado o equipamento de metalização de superfícies, que, por meio de plasma, faz o depósito de uma fina camada condutora na superfície do material. O metalizador usado é de marca Quorum, mostrado na Figura 25, modelo Q150RES. Na figura 26 é mostrado como o material metalizado foi colocado nos compartimentos do equipamento para análise.



Figura 25: Fotografia de metalizador realizando a deposição de material condutor na superfície de partes dos corpos de prova.

Fonte: A autoria própria, 2016.

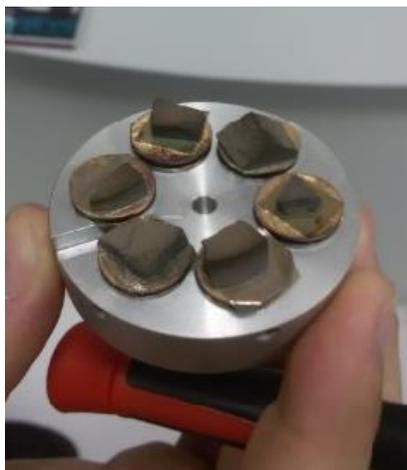


Figura 26: Fotografia de partes de superfícies dos corpos de prova preparadas para análise em MEV.

Fonte: Autoria própria, 2016.

#### 7.6. CARACTERIZAÇÃO DE PROPRIEDADES ELÉTRICAS EM ANALISADOR DE REDES VETORIAL E SIMULAÇÃO DE ABSORÇÃO DE RADIAÇÃO EM AMBIENTE VIRTUAL

A realização da caracterização elétrica com valores de permissividade (pelo método de sonda dielétrica) e tangentes de perdas em função das variações das dopagens e processamento em micro-ondas ou mufla foi feita pelo método de sonda dielétrica, o equipamento usado é o analisador de Redes Vetorial Agilent, mostrado na Figura 27, modelo 85070E, o range de frequência usado foi de 200MHz a 4.5GHz.

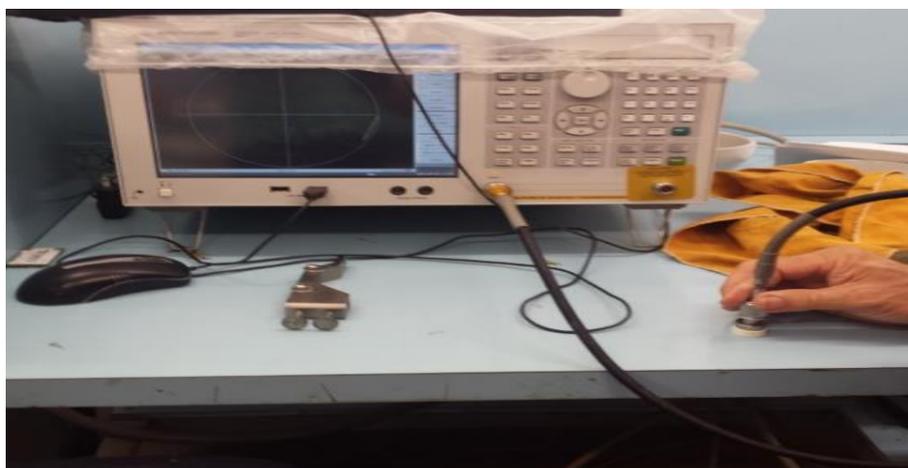


Figura 27: Fotografia de analisador de Redes Vetorial Agilent.

Fonte: Autoria própria, 2015.

Com os valores de permissividades e tangentes de perdas dos materiais e sabendo-se quais as melhores condições usadas para a obtenção de melhores valores para aplicação do material como absorvedor de radiação eletromagnética, foi realizada a simulação em ambiente virtual em software *Ansoft HFSS*® para observar a eficácia de um bloco absorvedor num guia de ondas escolhido para tais condições.

Na UFERSA estão localizados os equipamentos usados de: estufa e balança (laboratório de síntese), torno mecânico (laboratório de usinagem), prensa hidráulica (laboratório de soldagem), forno mufla (laboratório de solos), forno de micro-ondas (CITED – Centro Integrado de Inovação Tecnológica do Semi-Árido), difratômetro de Raios-X (laboratório de difração de raios-X), microscópio eletrônico de varredura (laboratório de fitotecnia). Na UERN, foi utilizado o equipamento de EDX (laboratório de física). Na UFRN fica localizado o analisador de redes vetorial (laboratório de caracterizações elétricas).

## 8. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Dentre os principais resultados obtidos durante os experimentos neste trabalho, serão discutidos os que se relacionam, principalmente, com os objetivos específicos estabelecidos inicialmente, que serão listados sucintamente na forma de tópicos a seguir:

- Limite de dopagem do pentóxido de nióbio com molibdênio;
- Imagens feitas em equipamento de Microscópio de Varredura eletrônica e análise das composições dos materiais antes e depois de seus processamentos;
- Integridade física dos corpos de prova após as sinterizações e avaliação de condições de trabalhabilidade do material para experimentos;
- Dados de propriedades elétricas (permissividade e tangente de perdas) e influência das variações de quantidades de molibdênio no material sobre valores de permissividade e tangente de perdas e identificação de melhores faixas de frequência para aplicação do material como material absorvedor de radiação eletromagnética;
- Simulação em software *Ansoft HFSS*® inserção de bloco absorvedor de radiação eletromagnética em guia de onda.

### 8.1 LIMITE DE DOPAGEM DO PENTÓXIDO DE NIÓBIO COM MOLIBDÊNIO

A dopagem tem como finalidade o aumento da tangente de perdas em determinada faixa de frequência, dessa forma o material adquirirá características de material absorvedor de micro-ondas, já o processamento de sinterização por micro-ondas tem como objetivo a agilização do processo – e mantendo a sua eficácia – e a redução de gastos com energia – tanto elétrica, como no caso do maior gasto em forno mufla, como energia para que ocorra a sinterização e coalescimento dos corpos de prova.

Durante as confecções dos corpos de prova, foram feitas dopagens de diferentes concentrações a fim de que fosse encontrada uma concentração ótima para a adição de molibdênio ao pentóxido de nióbio. Tal concentração foi encontrada quando foram realizados os processos de sinterização – tanto em forno mufla como em forno de micro-ondas –, onde, após sinterizados, os corpos de prova apresentaram regiões de não homogeneidade em suas superfícies. Isso pode ser explicado pelo coeficiente de dilatação do Mo que é elevado, comparado ao coeficiente de dilatação do pentóxido de

nióbio, onde o percentual de Mo acrescentado dilata ao ponto de formar protuberâncias na superfície. O limite de dopagem do pentóxido de nióbio foi de 2% (concentração na qual a integridade do corpo de prova foi comprometida).

Inicialmente, a proposta deste trabalho seria a realização da dopagem do pentóxido de nióbio não só com o pó de molibdênio, mas com o nióbio metálico em pó também. Apesar de terem sido feitas as dopagens, quando os corpos de prova de pentóxido de nióbio com diferentes concentrações de nióbio foram colocados em forno mufla, estes tiveram suas estruturas destruídas, e tal fato se deve a dois fatores principais: o tamanho das partículas metálicas de nióbio obtidas (que é muito maior que o pó do pentóxido de nióbio) – enquanto o nióbio tem partículas com diâmetro médio da ordem de 42 $\mu$ m, o pentóxido de nióbio tem partículas médias de, aproximadamente, 0.40 $\mu$ m, ou seja, as partículas metálicas tendo cerca de dez vezes o tamanho das do material cerâmico; a grande diferença de coeficientes de dilatação térmica do metal para o material cerâmico, o que pode ter justamente causado uma variação do tamanho das partículas de metal grandes o suficiente para que o corpo cerâmico como um todo não conseguisse resistir e quebrasse por inteira (ainda que a concentração de nióbio fosse muito pequena, da ordem de 0.1% em massa do total do corpo de prova). Na Figura 28 é possível observar como os corpos de prova se degradaram após a sinterização em forno mufla.

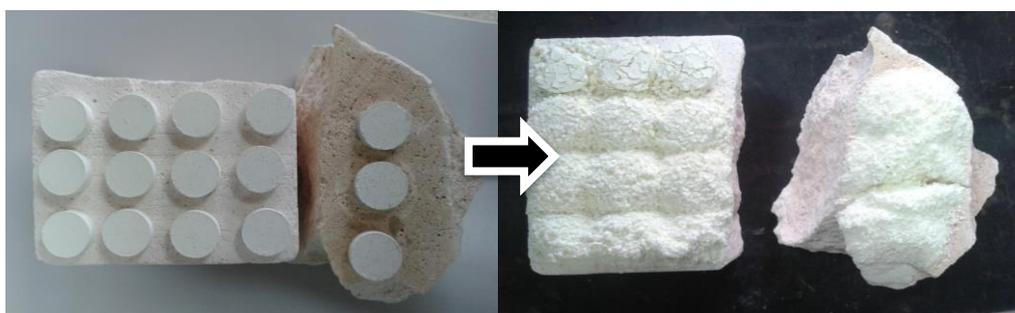


Figura 28: Fotografias de antes e depois dos corpos de prova de pentóxido de nióbio dopados com nióbio e serem postos no forno para sinterização à temperatura de 900°C por 4h.

Fonte: Autoria própria, 2015.

O molibdênio, por sua vez, possui as partículas médias da ordem de 3.5 $\mu$ m, e, ainda que haja uma diferença no coeficiente de dilatação térmica, mesmo pelas diferenças dos materiais (um metal e uma cerâmica), a semelhança entre estes tamanhos

de partículas contribuiu para que o corpo de prova ficasse com o mínimo de trabalhabilidade para serem manuseados e serem feitas as medições necessárias para ser dada a continuidade aos experimentos.

## 8.2 ANÁLISE DAS COMPOSIÇÕES DOS MATERIAIS

As análises das composições dos corpos de prova realizadas no EDX indicam que há a coerência dos valores das concentrações medidos nas criações das misturas antes e depois das sinterizações dos corpos de prova. Tais resultados quantitativos são observados nas Tabelas 7 a 12, que descrevem – em porcentagens – as quantidades de cada material encontrado nos corpos de prova.

Pentóxido de Níbio Puro (Em forno de micro-ondas)

<b>Material Identificado</b>	<b>Resultado</b>
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	99.321%

Tabela 6: Materiais identificados em EDX para corpo de prova de Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> sinterizado em forno de micro-ondas.

Fonte: Autoria própria, 2015.

Pentóxido de Níbio com dopagem de 0.5% de Molibdênio (Em forno mufla)

<b>Material Identificado</b>	<b>Resultado</b>
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	98.953%
Mo	0.548%

Tabela 7: Materiais identificados em EDX para corpo de prova de Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e 0.5% de molibdênio sinterizado em forno mufla.

Fonte: Autoria própria, 2015.

Pentóxido de Níbio com dopagem de 0.5% de Molibdênio (Em forno de micro-ondas)

<b>Material Identificado</b>	<b>Resultado</b>
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	98.756%
Mo	0.525%

Tabela 8: Materiais identificados em em EDX para corpo de prova de Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e 0.5% de molibdênio sinterizado em forno de micro-ondas.

Fonte: Autoria própria, 2015.

Pentóxido de Nióbio com dopagem de 1% de Molibdênio (Em forno mufla)	
Material Identificado	Resultado
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	98.362%
Mo	0.974%

Tabela 9: Materiais identificados em EDX para corpo de prova de Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e 1% de molibdênio sinterizado em forno mufla.

Fonte: Autoria própria, 2015.

Pentóxido de Nióbio com dopagem de 1% de Molibdênio (Em forno de micro-ondas)	
Material Identificado	Resultado
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	98.236%
Mo	1.054%

Tabela 10: Materiais identificados em EDX para corpo de prova de Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e 1% de molibdênio sinterizado em forno de micro-ondas.

Fonte: Autoria própria, 2015.

Pentóxido de Nióbio com dopagem de 2% de Molibdênio (Em forno de micro-ondas)	
Material Identificado	Resultado
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	97.697%
Mo	1.820%

Tabela 11: Materiais identificados em EDX para corpo de prova de Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e 2% de molibdênio sinterizado em forno de micro-ondas.

Fonte: Autoria própria, 2015.

Além dessas composições principais (Nb e Mo), foram identificados elementos como Cu, Zr, S, K, Ta, Ti, Zn e Mn, mas, estes, não devem ser levados em consideração para efeitos de medições ou quaisquer outras eventuais análises, já que suas concentrações são muito pequenas (com valores menores que 0.2%, chegando a serem identificados a concentrações de, até cerca de 0.05%) e podem ter sido identificados por motivos diversos – desde contatos com materiais que podem ter contaminado os corpos de prova, até componentes usados para a própria medição, como a película plástica usada como suporte para a colocação dos corpos de prova no equipamento.

Também foram feitas análises no difratômetro de raios-X (DRX) a fim de identificar se o processamento de sinterização tanto em forno mufla como em forno de micro-ondas promoveu a formação de alguma nova fase ou de algum outro material. A Figura 29 mostra os difratogramas do pentóxido de nióbio dopado com 0.5% de molibdênio não sinterizado, sinterizado em forno mufla e sinterizado em forno e micro-ondas.

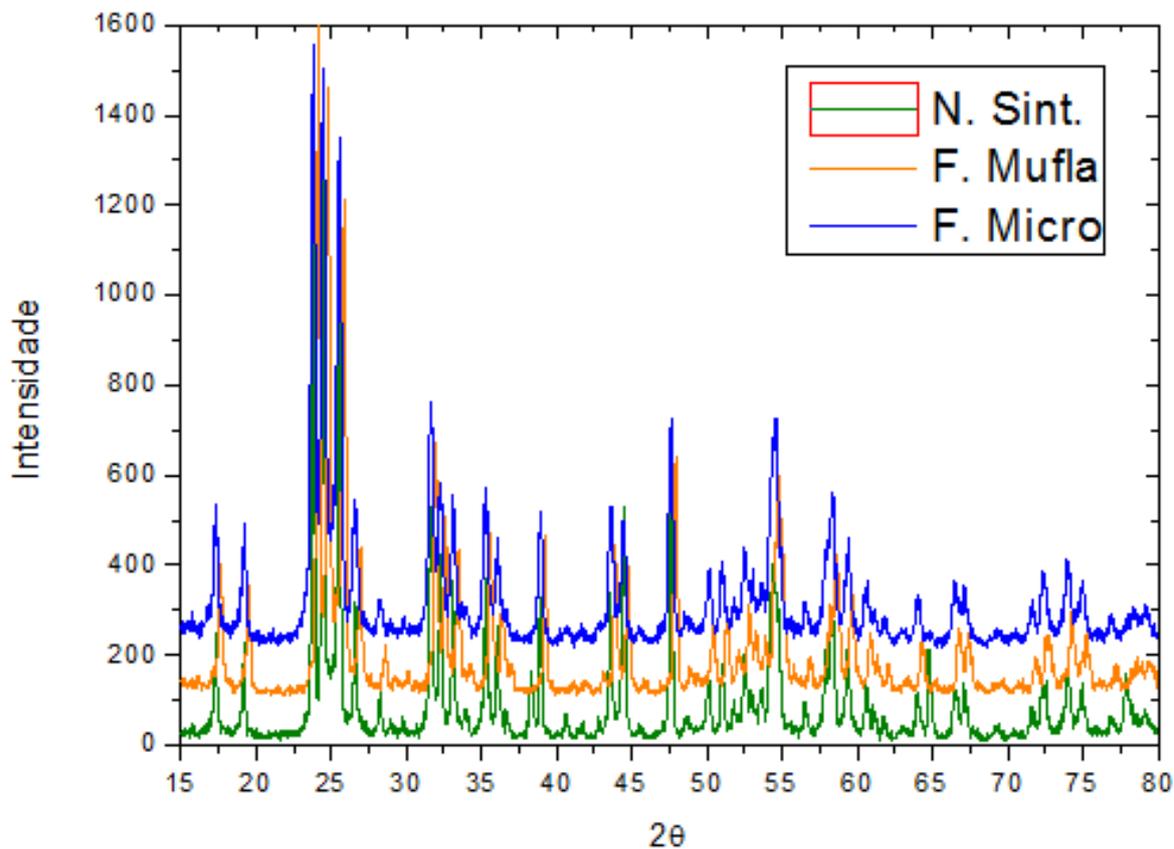


Figura 29: Difratogramas do pentóxido de nióbio dopado com 0.5% de molibdênio antes da sinterização e depois da sinterização tanto em forno mufla como em forno de micro-ondas.

Fonte: Autoria própria, 2016.

Como é possível observar, todos os picos se sobrepõem, possibilitando a conclusão de que não houve formação de nenhum material novo. Tal resultado é esperado, pois, como pretendido, não deveria ocorrer formação de fase com elemento dopante ou surgimento de outra, indicando a eficácia da dopagem.

### 8.3 CONSISTÊNCIAS DOS CORPOS DE PROVA APÓS AS SINTERIZAÇÕES

A etapa de sinterização tem como uma de suas finalidades garantir que seja feito um rearranjo das partículas do pó para uma melhoria na consistência porosa do material. Tanto após a sinterização em forno mufla como após a sinterização em forno de micro-ondas, houve uma diminuição das dispersões do pó da superfície, de forma que os corpos de prova apresentam consistência mais firme – em relação à dispersão de pó na superfície.

Foram realizadas análises das superfícies dos corpos de prova num microscópio eletrônico de varredura. As Figuras 30 a 32 foram obtidas e ilustradas:

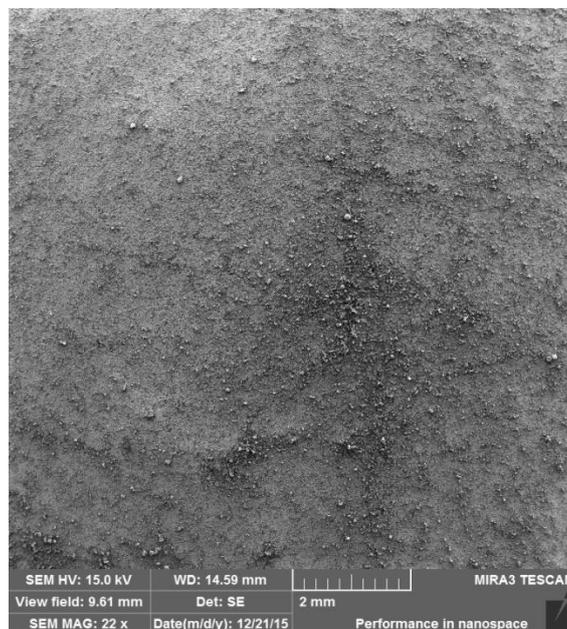


Figura 30: Fotomicrografia da superfície de corpo de prova de pentóxido de nióbio dopado com 1% de molibdênio e sinterizado em forno de micro-ondas.

Fonte: Autoria própria, 2015.

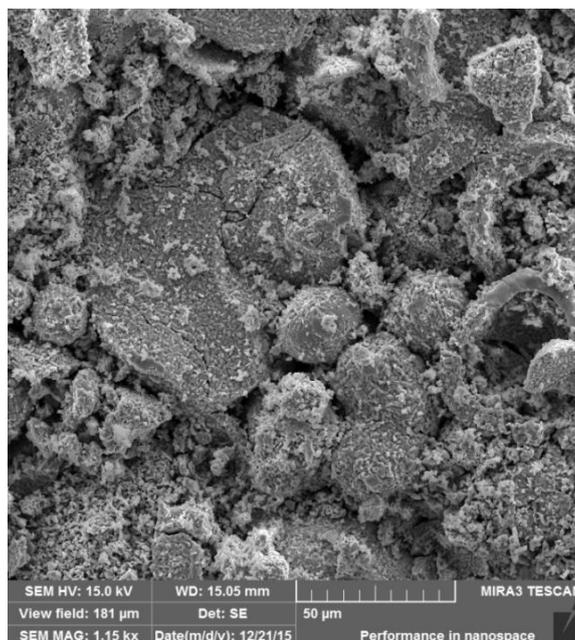


Figura 31: Fotomicrografia da superfície de corpo de prova de pentóxido de nióbio dopado com 1% de molibdênio e sinterizado em forno de micro-ondas com maior aproximação.

Fonte: Autoria própria, 2015.

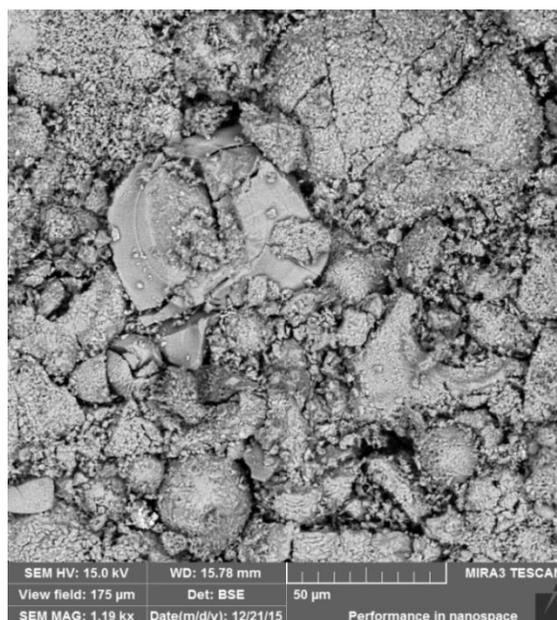


Figura 32: Fotomicrografia da superfície de corpo de prova de pentóxido de nióbio dopado com 1% de molibdênio e sinterizado em forno de micro-ondas e maior aproximação de outra região.

Fonte: Autoria própria, 2015.

Destas imagens anteriormente mostradas (da Figura 30 à 32), o objetivo de ilustrá-las era a obtenção de uma aproximação – na primeira o objetivo era a análise da superfície como um todo, que não foi possível devido a uma diferença de contrastes na superfície que só permitiu a captura de uma região, quase toda, do corpo de prova – que permitisse tanto a observação das partículas do pentóxido de nióbio, como também das partículas do molibdênio, o que não foi possível devido à concentração ser muito pequena, de forma que, mesmo com uma análise perspicaz, tornou-se muito difícil a identificação dos grãos de molibdênio na superfície. O recurso EDS desse equipamento de MEV também foi utilizado, mas não houve identificação, pelas superfícies, do molibdênio nas superfícies – apesar de ser uma concentração não tão pequena assim ao ponto de não ser identificado.

As Figuras 33 a 35 servirão para ilustrar uma comparação dos tamanhos das partículas do molibdênio e do nióbio metálico (que, inicialmente, também era um dos agentes dopantes propostos).

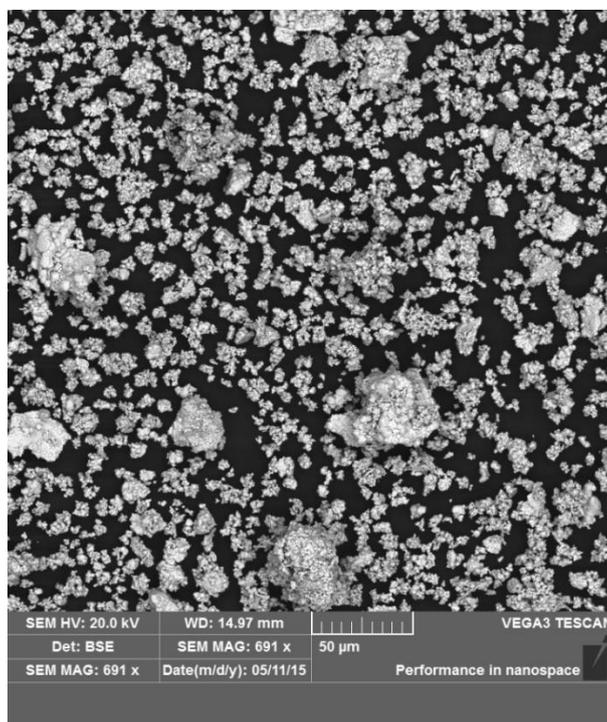


Figura 33: Fotomicrografia dos grãos de molibdênio em escala onde é possível a comparação dos tamanhos das suas partículas com o tamanho das partículas de nióbio.

Fonte: Autoria própria, 2015.

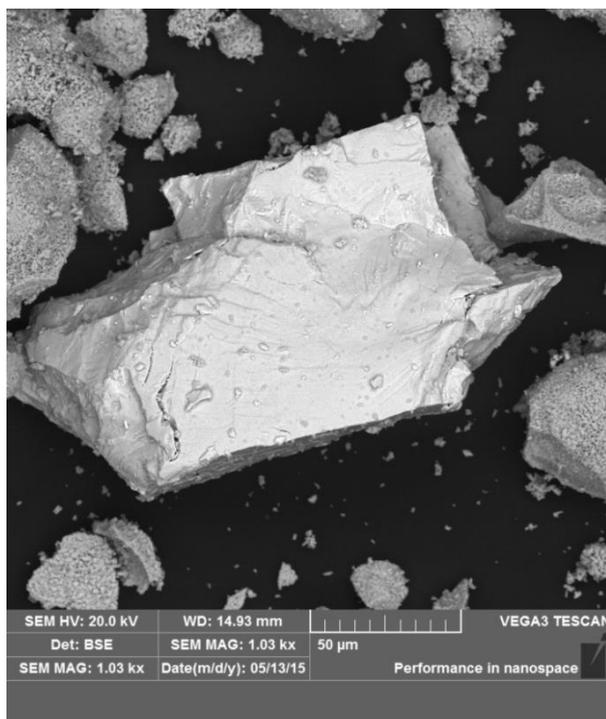


Figura 34: Fotomicrografia do grão de nióbio em escala onde é possível a comparação dos tamanhos das suas partículas com o tamanho das partículas de molibdênio.

Fonte: Autoria própria, 2015.

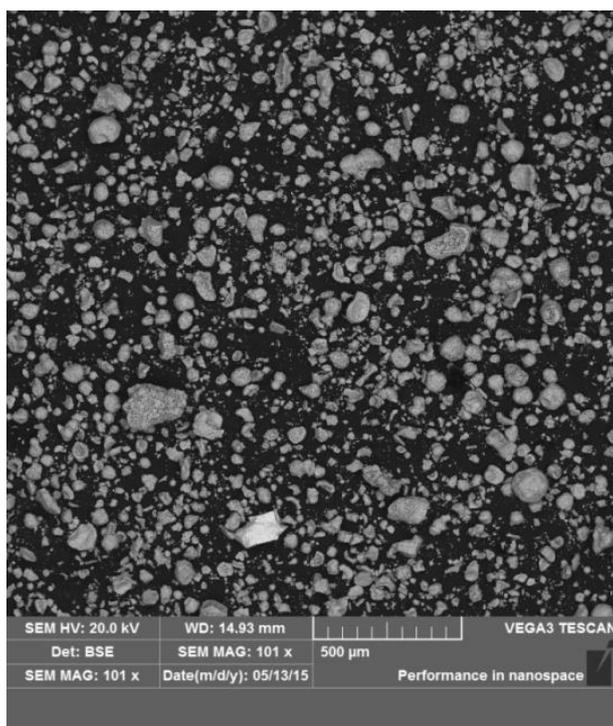


Figura 35: Fotomicrografia afastada da região escolhida para comparação dos tamanhos das partículas (pentóxido de nióbio dopado com 0.5% de nióbio).

Fonte: Autoria própria, 2015.

A Figura 36 foi obtida com uma amostra da mistura de pentóxido de nióbio dopado com 1% de molibdênio. Devido à concentração ser pequena, foi dificultada a identificação do pó metálico entre as partículas de pentóxido de nióbio – mesmo com a utilização do recurso de sinal BSE, que é usado para diferenciar os contrastes da imagem de acordo com o peso molecular dos materiais analisados.

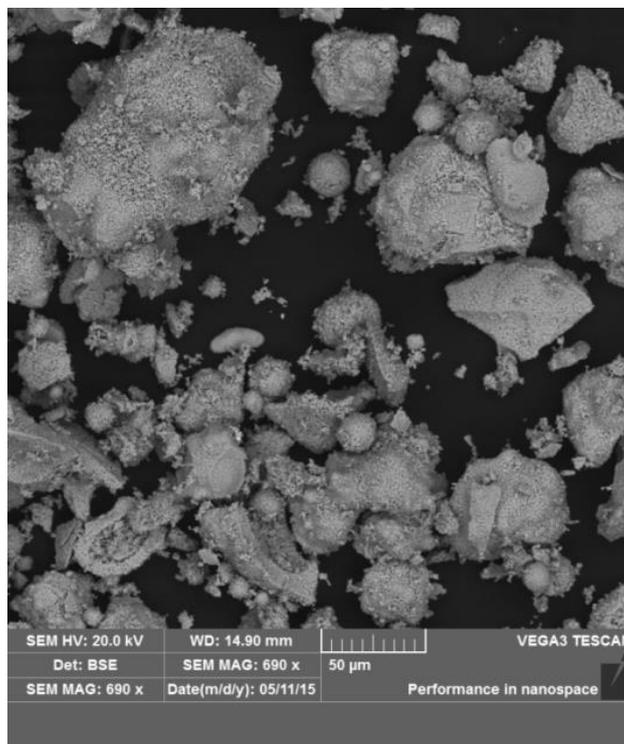


Figura 36: Fotomicrografia da mistura do pentóxido de nióbio dopado com 1% de molibdênio.

Fonte: Autoria própria, 2015.

#### 8.4 CARACTERIZAÇÕES ELÉTRICAS E DETERMINAÇÃO DE FAIXAS DE FREQUÊNCIAS PARA APLICAÇÃO DO MATERIAL COMO ABSORVEDOR DE RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA

Foram caracterizadas as variáveis de permissividade e tangente de perdas dos corpos de prova de pentóxido de nióbio dopado com molibdênio. Os resultados mais expressivos para fim de aplicação do material como absorvedor de radiação foram para as dopagens de 0.5% e 1% com molibdênio.

Como o valor de permissividade complexa está relacionado às perdas do material, quanto maior ele for, maior a tangente de perdas do material e, conseqüentemente, mais energia será dispersada para a dada faixa de frequência onde este estiver aumentando.

Para uma melhoria da expressividade desses valores, os gráficos que representam esse aumento de potencial para dispersar radiação eletromagnética serão expressos em função da frequência de operação por componente complexa da permissividade.

Nas Figuras 37 e 38 são ilustrados os gráficos que relacionam os valores de permissividade complexa em função da frequência dos corpos de prova de pentóxido de nióbio puros processados em forno mufla e de micro-ondas e dopados com molibdênio.

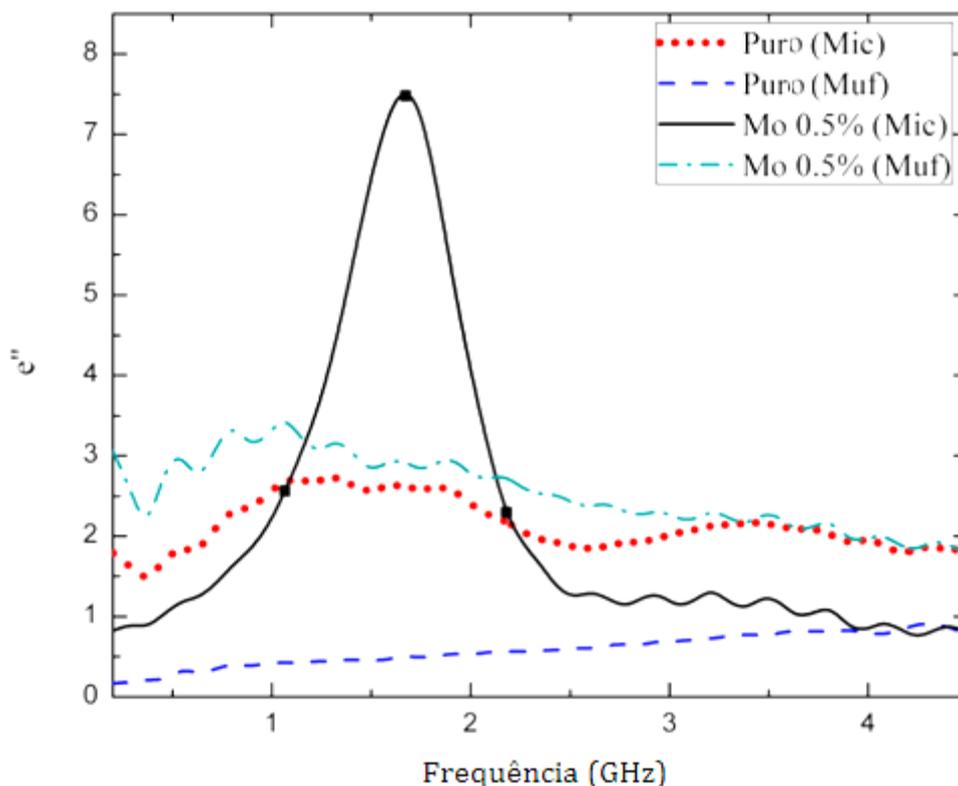


Figura 37: Curvas de valores de permissividade complexa por valores de frequência de operação de pentóxido de nióbio puro ou dopado com 0.5% de molibdênio e sinterizado em forno mufla ou forno de micro-ondas.

Fonte: Autoria própria, 2016.

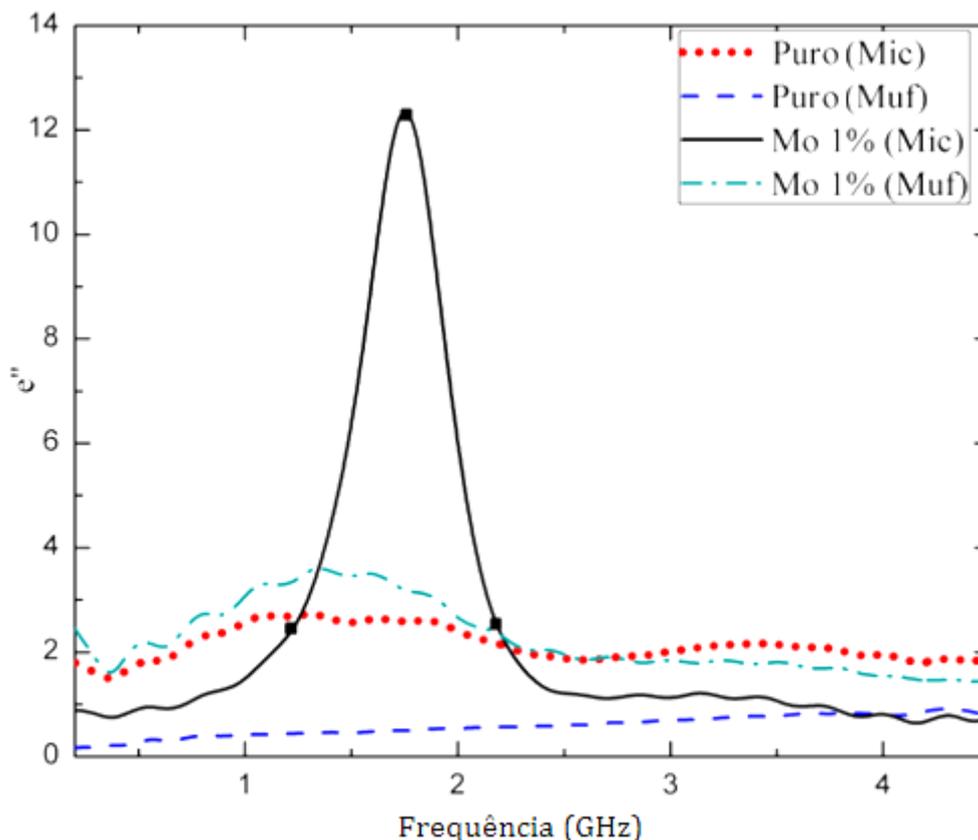


Figura 38: Curvas de valores de permissividade complexa por valores de frequência de operação de pentóxido de nióbio puro ou dopado com 1% de molibdênio e sinterizado em forno mufla ou forno de micro-ondas.

Fonte: Autoria própria, 2016.

Em ambos os gráficos, é possível observar que os corpos de prova que foram sinterizados em forno de micro-ondas apresentam picos dos valores de permissividades complexas, e, conseqüentemente, picos de valores de tangente de perdas, ou seja, essas regiões onde ocorrem os picos destes valores são justamente as melhores faixas de frequência para aplicação do material tendo-se em vista a sua aplicação para dispersar energia eletromagnética.

As Tabelas 13 e 14 indicam os valores medidos de permissividades complexas e de suas respectivas frequências (identificadas nos gráficos como marcas circulares), onde os pontos selecionados se dão quando estes valores começam a aumentar de forma mais significativa, onde culminam – as frequência onde a taxa de dissipação de energia é maior – e onde vão diminuindo.

Linha do corpo de prova de dopagem de 0.5% e sinterização em forno de micro-ondas	
Frequência (GHz)	$\epsilon''$
1.06	2.5203
1.662	7.6165
2.178	2.2739

Tabela 12: Valores medidos das melhores regiões onde há a dissipação de energia eletromagnética do corpo de prova de dopagem de 0.5% e sinterizado em forno de micro-ondas.

Fonte: Autoria própria, 2016.

Linha do corpo de prova de dopagem de 1% e sinterização em forno de micro-ondas	
Frequência (GHz)	$\epsilon''$
1.232	2.5203
1.748	12.8291
2.178	2.4878

Tabela 13: Valores medidos das melhores regiões onde há a dissipação de energia eletromagnética do corpo de prova de dopagem de 1% e sinterizado em forno de micro-ondas.

Fonte: Autoria própria, 2016.

De acordo com as Tabelas 14 e 15 e com os Figuras 37 e 38, é possível perceber que, dentre estas concentrações, a dopagem que resultou em maiores valores de permissividade complexa foi a de 1% de molibdênio, enquanto que, em relação ao processamento, a sinterização em forno de micro-ondas foi a que proporcionou as melhores características para aplicação como material absorvedor de radiação eletromagnética, visto que foi por meio desta que foram atingidos os maiores valores de absorção.

A banda que tem tais frequências compreendidas é a UHF (Ultra High Frequency), que vai de 0.3GHz a 3GHz. As aplicações para a faixa de frequência entre cerca de 1GHz e 2GHz, no Brasil, são desde sistemas de radiodifusão, radiolocalização, radionavegação e no setor aeronáutico até serviços de radioamador e serviços móveis – de acordo com o plano de atribuição, destinação e distribuição de faixas de frequências no Brasil (ANATEL, 2012).

## 8.6 SIMULAÇÃO DE BLOCO ABSORVEDOR DE RADIAÇÃO EM GUIA DE ONDAS

Com os melhores valores de permissividade e tangente de perdas para uso do material como absorvedor de radiação eletromagnética e com as melhores faixas de frequências às quais ele pode ser aplicado, é possível a simulação, em software *Ansoft HFSS*®, da colocação de um bloco do material – processado sob as melhores condições para a obtenção dos maiores valores de permissividade complexa –, em um guia de ondas para a observação da eficiência de absorção desse material. A Figura 39 mostra como foi disposto o bloco absorvedor no interior do guia de ondas.

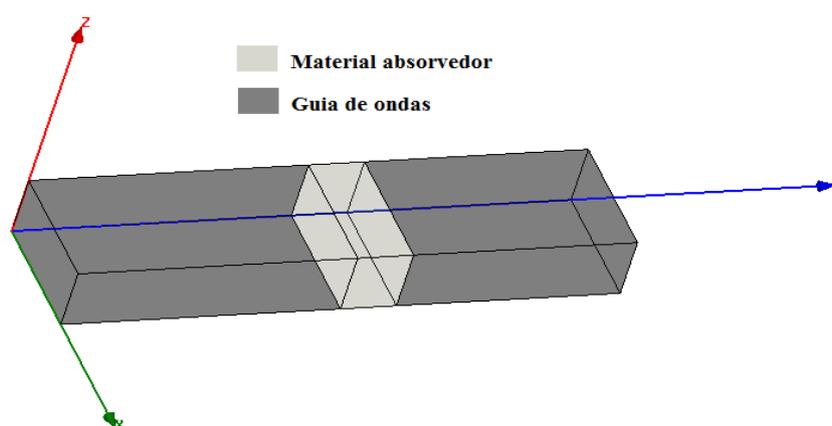


Figura 39: Ilustração de guia de ondas com um bloco de material absorvedor inserido em seu interior em software *Ansoft HFSS*®.

De acordo com a tabela com as padronizações de guias de ondas da EIA (Electronics Industry Association – EUA), para a faixa de frequência que é compreendida entre cerca de pouco mais de 1GHz e 2GHz, é escolhido um guia de ondas de especificação WR 510, que tem banda de operação entre 1.45GHz e 2.2GHz, suas dimensões são de 5.1 por 2.55 polegadas (0.1295m X 0.06477m).

Considerando-se o melhor corpo de prova para aplicação como material absorvedor sendo o de pentóxido de nióbio dopado com 1% de molibdênio e processado em forno de micro-ondas, tem-se que, para o ponto onde há maior dissipação de energia, a tangente de perdas tem valor igual a 1.01768 e valor de permissividade complexa igual a 12.8291 (à frequência de operação de 1.748GHz).

Para a simulação e análise de como ocorre a propagação da onda eletromagnética no guia com um bloco sólido do material inserido em seu interior, na inserção de valores no programa, serão postos os valores da componente real da permissividade, da tangente de perdas do material e da sua condutividade.

Para o cálculo da condutividade, será usada a condição de propagação da onda em meios com perdas, mostrada nas equações a seguir:

$$tg\theta = \frac{\sigma}{\omega\varepsilon} \quad (124)$$

onde:

$$\varepsilon' = \varepsilon = \varepsilon_0\varepsilon_r \quad (125)$$

Com  $\varepsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} F/m$  e com a relação feita a seguir, é possível a obtenção dos valores de condutividade dos corpos de prova analisados:

$$\varepsilon'' = \frac{\sigma}{\omega} = \varepsilon tg\theta \quad (126)$$

Para as condições do material sendo o pentóxido de nióbio, dopado com molibdênio e sinterizado em forno de micro-ondas, o valor de condutividade calculado foi de 1.247 S/m.

Com todos estes valores inseridos na criação de um novo material (pentóxido de nióbio dopado com 1% de molibdênio), é possível fazer uma análise de como este material absorverá radiação quando colocado na forma de um bloco no interior do guia de ondas especificado. Na Figura 40 é mostrada uma sequência de imagens que mostram como ocorreu a propagação da onda no interior do guia e como ela se comporta quando incide no bloco de pentóxido de nióbio dopado com 1% de molibdênio inserido:

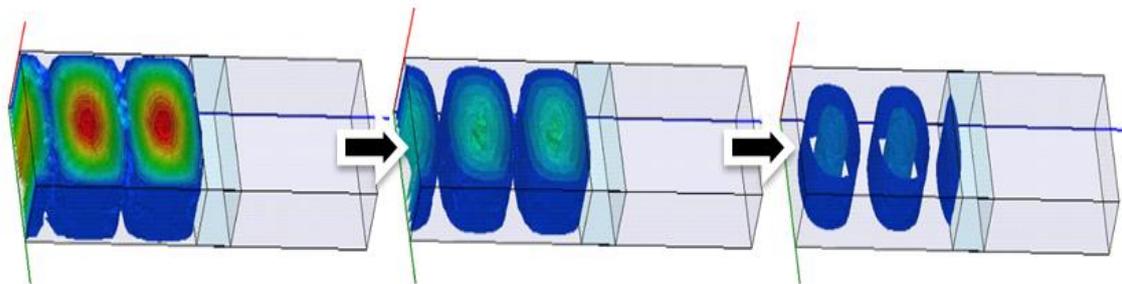


Figura 40: Sequência de imagens de como ocorreu a propagação de onda eletromagnética em bloco de pentóxido de nióbio dopado com 1% de molibdênio e sinterizado em forno de micro-ondas inserido num guia de ondas WR 510 simulado em software *Ansoft HFSS*®.

Fonte: Autoria própria, 2016.

Como é possível observar, o material age como um absorvedor, não permitindo a passagem da onda através dele. Assim como mostrado nesta imagem do comportamento de ondas no interior do guia de onda com um bloco de pentóxido de nióbio dopado com 1% de molibdênio e sinterizado em micro-ondas em seu interior, o comportamento para a dopagem de 0.5% de molibdênio e mesmo processamento de sinterização (em forno de micro-ondas) também foi muito semelhante, mas, neste caso, como houve uma dopagem menor, o que aconteceu foi uma maior penetração ao longo do bloco, uma vez que a condutividade, para este caso (de dopagem de 0.5%) é maior.

A simulação anterior foi feita para o melhor – no caso, o maior – valor de condutividade encontrado – que foi o do pentóxido de nióbio dopado com 1% de molibdênio. Os valores das componentes reais e complexas de permissividade, das tangentes de perdas e de condutividades para os outros corpos de prova analisados estão indicados na Tabela 15 (as indicações na tabela estão feitas, respectivamente, pela concentração da dopagem em porcentagens, onde o “p” significa o pentóxido de nióbio puro, seguida pelo tipo de processamento de sinterização, onde o símbolo “ $\mu$ ” representa o processamento em forno de micro-ondas e a abreviação “f.m.” representa o processamento em forno mufla):

-	Frequência de 1.662GHz		Frequência de 1.748GHz			
	0.5% $\mu$	0.5% $f.m.$	1% $\mu$	1% $f.m.$	$p.\mu$	$p.f.m.$
$tg\theta$	0.66613	0.22251	1.01768	0.27826	0.17807	0.05424
$e''$	7.6165	2.9523	12.8291	3.1449	2.566	0.4852
$e'$	11.4339	13.2684	12.6062	11.3019	14.41	8.9457
$\sigma$ (S/m)	0.704	0.273	1.247	0.306	0.249	0.047

Tabela 14: Valores de tangente de perdas, componentes reais e complexas de permissividade e condutividade do pentóxido de nióbio puro e dopado com 0.5% e 1% de molibdênio.

Fonte: Autoria própria, 2016.

A Figura 41 mostra uma sequência de imagens que é referente ao comportamento de ondas para o caso do pentóxido de nióbio dopado com 1% de molibdênio, porém, processado em forno tipo mufla.

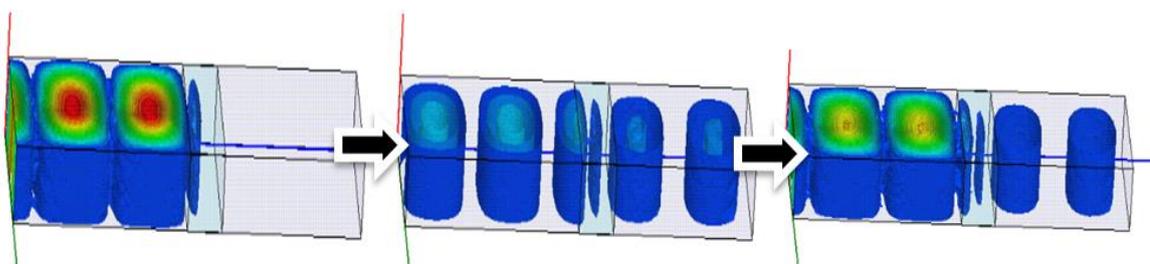


Figura 41: Sequência de imagens de como ocorreu a propagação de onda eletromagnética em bloco de pentóxido de nióbio dopado com 1% de molibdênio e sinterizado em forno tipo mufla inserido num guia de ondas WR 510 simulado em software *Ansoft HFSS*®.

Fonte: Autoria própria, 2016.

É observar que, pelo fato de o material estar dopado, houve o aumento da condutividade, dificultando a passagem da onda, mas, apesar disso, foi possível a sua passagem. Tal comportamento pode ter ocorrido devido à expansão das partículas metálicas de molibdênio durante o aquecimento do corpo de prova na etapa de sinterização, modificando, assim, a porosidade do material.

Pela Tabela 15 (dos valores das condutividades dos materiais analisados), é possível observar que os maiores valores de condutividade se deram para as condições de dopagem onde o processamento foi em forno de micro-ondas, que faz uso um mecanismo diferente de aquecimento para a sinterização, desta forma, não havendo tal expansão dos grãos metálicos como no forno mufla, a porosidade não é aumentada – o que é desejável para o impedimento da passagem da onda pelo material.

Na Figura 42 será mostrada outra sequência de imagens de propagação de ondas simulada, porém, nesta, será possível ver como ela ocorre no material puro, dopagem nenhuma, sinterizado em forno tipo mufla, que foi a condição que proporcionou a obtenção do menor valor de condutividade.

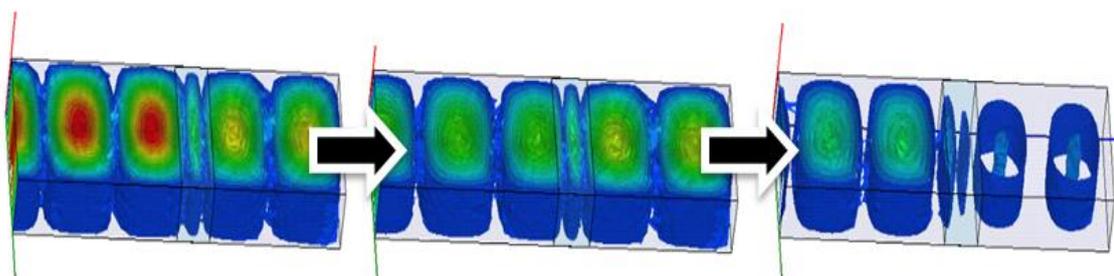


Figura 42: Sequência de imagens de como ocorreu a propagação de onda eletromagnética em bloco de pentóxido de nióbio puro e sinterizado em forno tipo mufla inserido num guia de ondas WR 510 simulado em software *Ansoft HFSS*®.

Fonte: Autoria própria, 2016.

Nesta imagem é possível visualizar quão facilmente a onda penetra o material – que não está dopado e foi sinterizado em forno tipo mufla – e segue se propagando após essa passagem. Com as ilustrações das simulações do maior valor de condutividade, que foi do material dopado e com processamento em forno de micro-ondas, do valor de maior condutividade entre os processados em forno tipo mufla, e do valor de menor condutividade obtido de todos os corpos de prova – não dopado e processado em forno mufla –, a ilustração das outras três simulações é dispensável, uma vez que, com tais valores, é possível ter uma percepção clara tanto da influência da dopagem, como da influência do processo de sinterização nas propriedades elétricas dos materiais.

De forma sucinta, reunindo todas as observações feitas até então, a dopagem com molibdênio juntamente com o processamento do material em forno de micro-ondas

garante a obtenção de um material que pode ser usado como absorvedor de radiação eletromagnética; O processamento do material em forno mufla tem efeitos sobre a porosidade do material, e, além disso, por meio dele, não foram obtidos valores altos de condutividade como os obtidos no processamento em forno de micro-ondas; A dopagem por si só, em casos de processamento em forno mufla, não é suficiente para tornar os corpos de prova materiais absorvedores de radiação eletromagnética já que, apesar de dificultar ainda ocorre a travessia das ondas pelo material, assim como o processamento por si só – sem a dopagem com o molibdênio – também não torna o material um absorvedor – embora tenha proporcionado um certo aumento da condutividade em relação ao processado em forno mufla.

Na Tabela 16 são mostrados valores de materiais, que, de acordo com suas condutividades, podem ser classificados como condutores, semicondutores ou isolantes.

<b>Material</b>	<b>Substância</b>	<b>Condutividade <math>[(\Omega \cdot m)^{-1}]</math></b>
Condutor	Prata	$6.8 \times 10^7$
	Cobre	$6.0 \times 10^7$
	Ouro	$4.3 \times 10^7$
	Alumínio	$3.8 \times 10^7$
	Ferro	$1.0 \times 10^7$
	Aço-carbono	$0.6 \times 10^7$
	Aço inoxidável	$0.2 \times 10^7$
	Grafite	$1.7 \times 10^2$
Semicondutor	Germânio (puro)	2.1
	Silício (puro)	$4.6 \times 10^{-4}$
Isolante	Vidro	$1.0 \times 10^{-11}$
	Borracha	$1.1 \times 10^{-15}$

Tabela 15: Condutividades elétricas à temperatura ambiente para diferentes materiais condutores, semicondutores e isolantes.

Fonte: Adaptado de CALLISTER, 2013, e de FEUP, 2014.

A Figura 43 também faz uma relação de valores de condutividades de materiais isolantes, semicondutores e isolantes em ordem crescente.

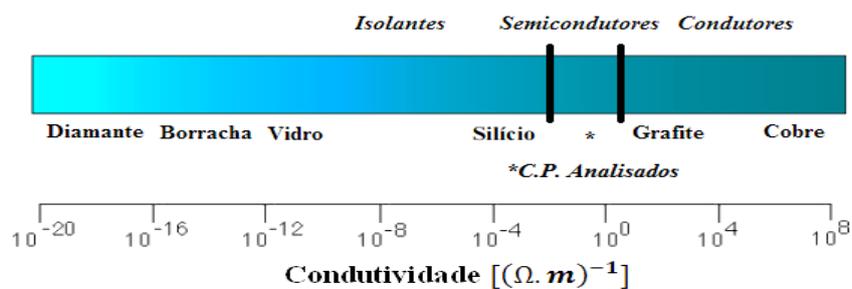


Figura 43: Imagem da escala de condutividade elétrica dos materiais ordenados de isolantes, semicondutores e condutores (onde “\*C.P. Analisados” são os corpos de prova dos materiais estudados no presente trabalho).

Fonte: Adaptado de FEUP, 2014.

Analisando os valores de condutividade da Tabela 15 em comparativo com as classificações da Tabela 16 e observando a Figura 42, é possível concluir – apesar de não haverem valores exatos que delimitem as classificações de materiais isolantes, semicondutores e condutores – que o material de estudo pode ser classificado como um material semicondutor.

## 9. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

A dopagem do pentóxido de nióbio com molibdênio e o uso do processamento de sinterização dos corpos de prova em forno de micro-ondas mostraram-se eficientes em relação a tornar o composto aplicável como material absorvedor de radiação eletromagnética, tendo em vista que, dessa forma, foram garantidas melhorias nos valores de permissividade complexa, permitindo maior taxa de dissipação de energia no material.

Enquanto as medições indicam que há uma determinada faixa de frequências onde o material é mais aplicável como absorvedor, na simulação em guia de ondas selecionado para as faixas de frequência onde os valores de absorção são maiores, é possível analisar a eficiência do mesmo, que não permite a passagem de energia eletromagnética, dissipando-a em seu interior.

As obtenções de dados como a taxa de aquecimento durante a sinterização em micro-ondas, não ocorreram de forma muito consistente, uma vez que alguns parâmetros operacionais não estavam sendo completamente controlados ou não estava havendo um acompanhamento de variáveis como desejável num processamento de sinterização por micro-ondas. Foi utilizado um forno de micro-ondas convencional, desprovido de sensores ou outros controladores, dessa forma, não houve um controle preciso de temperatura na etapa de sinterização. As variáveis controladas foram, basicamente, o tempo e a potência utilizada pelo micro-ondas, e, apesar de refeitos com sensor óptico e com sensor de contato, estes não permitiram uma avaliação consistente das variações de temperatura dos corpos de prova. De toda forma, mesmo sem o controle e acompanhamento das temperaturas, sob as circunstâncias descritas, o processo de sinterização em forno de micro-ondas, juntamente com a dopagem com molibdênio, foi eficiente e permitiu uma melhoria nos valores de permissividade complexa, de tangente de perdas do material, e, conseqüentemente, de condutividade, tornando-o utilizável como material absorvedor de radiação eletromagnética.

Com tais considerações feitas, seria desejável a realização das sinterizações sob condições de controle melhores, onde houvesse um acompanhamento das variações de temperaturas dos corpos de prova e pudessem ser feitos os controles das temperaturas, de forma que esta poderia ser uma variável interessante a ser estudada.

Além dessas principais propriedades elétricas medidas, com a sinterização dos corpos de prova em forno de micro-ondas, foi possível observar uma melhoria na

qualidade superficial dos mesmos, melhorando a maneabilidade e deixando o material mais consistente na superfície. Para se fazer uma análise desta propriedade e quantificar a variação desta, seria interessante a realização de ensaios de micro dureza superficial. Para efeitos de manuseio e aplicações em circunstâncias que exigissem maior resistência do material, também poderiam ter importância, nesse sentido, a realização de ensaios mecânicos.

Ainda sobre as condições que foram usadas para as confecções e processamentos dos corpos de prova do presente trabalho, algumas variáveis que também poderiam ser estudadas mais a fundo poderiam ser as influências dos tempos de sinterização, das pressões usadas nas compressões ou até o tempo de acomodação dos corpos de prova na matriz após a aplicação da pressão.

Para efeitos de comparação com outros materiais, poderia ser feitas análises da própria mudança do material usado na dopagem, como outros metais ou componentes ferríticos – podendo ser conveniente, inclusive, no âmbito da justificativa do uso do nióbio como recurso abundante no país, o uso do nióbio metálico com uma granulometria muito menor, que, mesmo sabendo-se da sua difícil obtenção, não deixa de ser uma alternativa para análise.

Em relação ao uso de materiais usados como suceptores para fins de absorção de radiação, poderia, também, ser feito um estudo com a cobertura, apenas superficial, dos corpos de prova com materiais conhecidos e aplicados nesse sentido, como carbetos de silício e óxido de cobre – que pode ser sintetizado em laboratório –, sendo, dessa forma, necessária uma maior discussão sobre as formas nas quais serão feitas essas coberturas – para o mantimento das características físicas dos corpos de prova.

Também poderia ser feito o posicionamento de tais materiais num guia de ondas – no caso, como identificado, um do tipo WR510 – para a observação prática da absorvidade do material, outra forma de obtenção desses valores seria pela medição de refletividade dos materiais pelo método do arco NRL (Naval Research Laboratories), identificando a eficiência dos materiais, também, de acordo com os valores de atenuação obtidos.

Os resultados obtidos no presente trabalho foram satisfatórios, uma vez que dopagem do pentóxido de nióbio com molibdênio se mostrou eficaz no sentido de garantir a ele um aumento nos valores de condutividade do material, e, embora somente a dopagem não tenha sido suficiente para poder ser garantir que o material pode ser tido como de absorvedor de radiação eletromagnético ao material, o conjunto de fatores de

dopagem com molibdênio e sinterização em forno de micro-ondas melhorou, significativamente, os valores de condutividade do material, fazendo-o absorver as ondas incidentes sobre ele – como observado através de simulação.

## 10. REFERÊNCIAS

ANATEL (Org.) **Plano de atribuição, destinação e distribuição de faixas de frequência no Brasil.** 2012. Disponível em: <<http://www.anatel.gov.br/Portal/verificaDocumentos/documento.asp?numeroPublicacao=276624&assuntoPublicacao=null&caminhoRel=null&filtro=1&documentoPath=276624.pdf>>. Acesso em: 12 nov. 2015.

ARMAS, Sistemas de (Org.). **Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética.** 2003. Disponível em: <<http://sistemasdearmas.com.br/ge/furt03ram.html>>. Acesso em: 20 nov. 2015.

ASSIS, Mauro S.. **Introdução à propagação das ondas eletromagnéticas.** 2012. Encontro Anual em Comunicações, Redes e Criptografia.. Disponível em: <[http://www.iecom.org.br/encom\\_2012/Introducao\\_a\\_Propagacao.pdf](http://www.iecom.org.br/encom_2012/Introducao_a_Propagacao.pdf)>. Acesso em: 03 dez. 2015.

BALANIS, C. A. **Antenna Theory: analysis and design.** New York: John Wiley Sons, 1989a.

BONADIO, Taiana Gabriela Moretti. **Estudos dos Compósitos TiO<sub>2</sub>-Hidroxiapatita e Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-Hidroxiapatita: Comportamento Físicomecânico, Estrutural e de Bioatividade.** 2011. 134 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Física, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2011.

BRITO, F. Iran Gomes de; MEDEIROS, Katarine F.; LOURENÇO, Jorge Magner. UM ESTUDO TEÓRICO SOBRE A SINTERIZAÇÃO NA METALURGIA DO PÓ. **Holos**, [s.l.], v. 3, n. 23, p.204-211, 23 maio 2008. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN).

CALLISTER., William D Jr.. RETHWISCH, David G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução.** Tradução de Sergio Murilo Stamile Soares. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013. Título original: Material science and engineering: an introduction, 8th. ed.

CARVALHO, Maria Inês Barbosa de. **Guias de onda: Eletrotecnia teórica.** 2005. FEUP. Disponível em: <[https://web.fe.up.pt/~hsalgado/ETeorica/docs/guias\\_v2.pdf](https://web.fe.up.pt/~hsalgado/ETeorica/docs/guias_v2.pdf)>. Acesso em: 13 nov. 2015.

CBMM, Companhia Brasileira de Minas e Mineração - (Org.). **Nióbio.** 2012. Disponível em: <<http://www.cbmm.com.br/br/p/66/historia-do-niobio.aspx>>. Acesso em: 22 out. 2014.

CERNIAK, Samuel Nogueira. **Estudo e desenvolvimento de um capacitor eletrolítico de nióbio.** 2012. Disponível em: <<http://repositorio.ufrn.br:8080/jspui/handle/123456789/12713>>. Acesso em: 15 nov. 2014.

CGEE, Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. **Materiais Avançados: 2010-2022.** Brasília: Cgee, 2010.

CHIAVERINI, Vicente. **Metalurgia do pó.** 4. ed. São Paulo: Abm, 2001. 326 p.

COSTA, A.a. da. **Atenuação em guias de onda.** 2013. Disponível em: <<https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/3779571690467/ATENUACAO.doc>>. Acesso em: 07 dez. 2015.

DARTORA, Cesar Augusto. **Ondas eletromagnéticas em meios materiais.** 2005. Curitiba - Universidade Federal do Paraná. Disponível em: <[http://www.eletrica.ufpr.br/cadartora/Documentos/TE053/05-Ondas\\_em\\_Meios\\_Materiais.pdf](http://www.eletrica.ufpr.br/cadartora/Documentos/TE053/05-Ondas_em_Meios_Materiais.pdf)>. Acesso em: 11 dez. 2015.

DIAS et al., Josiane de Castro. **Refletividade de Fótons Micro-ondas por Tintas Poliuretânicas Aditadas com Ferritas de NiZn e MnZn.** 2005. Revista de Física Aplicada e Instrumentação, vol. 18, no. 1. Disponível em: <[http://www.sbfisica.org.br/rfai/Vol18/Num1/v18\\_24.pdf](http://www.sbfisica.org.br/rfai/Vol18/Num1/v18_24.pdf)>. Acesso em: 27 set. 2015.

DIAS, Josiane de castro; SILVA, Fábio Santos da; REZENDE, Mirabel Cerqueira. **Absorvedores de radiação eletromagnética aplicados no setor aeronáutico.** Revista de Ciência e Tecnologia, Vol. 15, Jun. 2000.

EDMINISTER, J. A. **Eletromagnetismo.** São Paulo: Mc-Graw-Hill do Brasil, p. 15-134. 1980.

E-FÍSICA. **Ondas Eletromagnéticas.** 2007. Disponível em: <<http://efisica.if.usp.br/electricidade/universitario/ondas/conclusao/>>. Acesso em: 07 dez. 2015.

EISENCRAFT, Marcio. **Propagação de sinais:** Notas de Aula. 2004. Curso de Engenharia Elétrica. Disponível em: <<http://professor.ufabc.edu.br/marcio.eisencraft/Artigos/PropagacaodeSinais.pdf>>. Acesso em: 07 dez. 2015.

EMSLEY, John. **Nature's Building Blocks.** 2001. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=j-Xu07p3cKwC&pg=PA265&hl=pt-BR#v=onepage&q&f=false>>. Acesso em: 18 fev. 2016.

FAEZ, Roselena; REZENDE, Mirabel C.; MARTIN, Inácio M.. **Polímeros Condutores Intrínsecos e Seu Potencial em Blindagem de Radiações Eletromagnéticas.** 2000. Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 10, nº 3, p. 130-137. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/po/v10n3/3505.pdf>>. Acesso em: 29 set. 2015.

FERREIRA, Taciano Peres. **Preparação e caracterização de materiais híbridos de magnetita/polianilina por polimerização in situ.** 2011. 140 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências Moleculares, Universidade Estadual de Goiás, Anápolis, 2011.

FEUP (Org.). **Materiais Condutores Usados em Engenharia Elétrica.** 2014. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores. Disponível em:

<<http://paginas.fe.up.pt/~mcnunes/QMAR0708/materiaiscondutoresQMAR.pdf>>.

Acesso em: 20 abr. 2016.

FOLGUEIRAS, Luiza de Castro; REZENDE, Mirabel Cerqueira. **Processamento de material absorvedor de radiação eletromagnética a partir da impregnação de tecido de fibra de vidro com polímero condutor polianilina**. Revista de Ciências Exatas, Vol. 12, NO 2, Taubaté, 2006.

FONTANA, Eduardo. **Capítulo 10 - Guias de Onda**. 2013. UFPE. Disponível em: <<https://www.ufpe.br/fontana/Eletromagnetismo2/EletromagnetismoWebParte02/mag2cap10.htm#mozTocId135455>>. Acesso em: 13 nov. 2015.

FREIRE J., FILGUEIRA M., GOMES U. U. Estudo de sinterização do nióbio ativado com paládio e níquel. **Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo**, Natal, v. 12, n. 1-2, p.32-36, nov. 1993.

GABRIELLI, Lucas Heitzmann. **Guias Metálicos Retangulares**. 2010. UEC. Disponível em: <<http://www.decom.fee.unicamp.br/~lucashg/courses/ee754/2b-guias-retangular.pdf>>. Acesso em: 06 nov. 2015.

HAYT, William H.; BUCK, John A.. **Eletromagnetismo**. 8. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 595 p.

KIM, Y.J; KIM, S.S. **Microwave absorbind properties of co-substituted Ni<sub>2</sub>W Hexaferrites in Ka-Band Frequencies (26.5-40 GHz)**. IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 38. NO. 5, Set. 2002.

KRAUS, John D.; CARVER. **Electromagnetics**. 1973. Second Edition, McGraw-Hill. Disponível em: <[https://archive.org/stream/Electromagnetics\\_559/KrausCarver-Electromagnetics#page/n393/mode/2up](https://archive.org/stream/Electromagnetics_559/KrausCarver-Electromagnetics#page/n393/mode/2up)>. Acesso em: 10 dez. 2015.

LEE, S. M. **International Encyclopedia of Composites**, vol. 6, VHC Publishers, New York, 1991.

LETTUNE, Vicete Castelo Branco. **Pentóxido de nióbio como carga para materiais de base polimérica para uso odontológico.** 2012. 84 f. Tese (Doutorado) - Curso de Odontologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

LIMA, Antonio Guilherme Garcia. **Espectro eletromagnético.** 2015. Disponível em: <<http://www.antonioгуilherme.web.br.com/blog/materiais/particulas-materiais/espectro-eletromagnetico/>>. Acesso em: 18 nov. 2015.

LONDON METAL EXCHANGE. **Pie chart of world Mo uses.** 2014. Disponível em: <<http://www.lme.com/minormetals/6782.asp>>. Acesso em: 18 fev. 2016.

LOURENÇO, Roberto Wagner. **Espectro eletromagnético.** 2012. UNESP. Disponível em: <[http://www2.sorocaba.unesp.br/professor/robertow/Arquivos2012/SR\\_2012/Aula\\_5\\_REM.pdf](http://www2.sorocaba.unesp.br/professor/robertow/Arquivos2012/SR_2012/Aula_5_REM.pdf)>. Acesso em: 07 dez. 2015.

MARCHI, Juliana. **Sinterização via fase líquida de cerâmicas à base de carvão de silício com aditivos óxidos utilizando planejamento de experimentos.** 2003. 264 f. Tese (Doutorado) - Curso de Tecnologia Nuclear, Autarquia Associada à Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

MARINHO, Charlles de Souza. **Caracterização de Materiais Absorvedores de Ondas Eletromagnéticas (MARE) - I.** 2010. Disponível em: <<http://www.teleco.com.br/pdfs/tutorialcaracmat.pdf>>. Acesso em: 26 set. 2015.

MICROWAVETOWN (Org.). **90 degree Twist Waveguide Section.** 2014. Disponível em: <<http://www.microwavetown.com/90-degree-Twist-Waveguide-Section/>>. Acesso em: 08 abr. 2016.

MILLHOLLAND, Ray. **Battle of the Billions: American industry mobilizes machines, materials, and men for a job as big as digging 40 Panama Canals in one year.1941.** Disponível em: <[https://books.google.com.br/books?id=xScDAAAAMBAJ&pg=PA56&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.br/books?id=xScDAAAAMBAJ&pg=PA56&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false)>. Acesso em: 18 fev. 2016.

MILLITECH (Org.). **Smiths Microwave**. 2009. Disponível em: <<http://www.millitech.com/MMW-Antenna-LinearCircularPolarizer.htm>>. Acesso em: 08 abr. 2016.

MOTTA, Felipe Piccinini. **Propriedades de revestimentos de nióbio obtidos por aspersão térmica a plasma sobre aço API 5L X65**. 2011. 97 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Minas, Metalurgia e Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

MSPC (Org.). **Nióbio - Nb**. 2007. Disponível em: <[http://www.mspc.eng.br/quim1/quim1\\_041.shtml](http://www.mspc.eng.br/quim1/quim1_041.shtml)>. Acesso em: 26 abr. 2016.

MSPC (Org.). **Molibdênio - Mo**. 2007. Disponível em: <[http://www.mspc.eng.br/quim1/quim1\\_042.shtml](http://www.mspc.eng.br/quim1/quim1_042.shtml)>. Acesso em: 26 maio 2016.

NOTAROS, Branislav M.. **Eletromagnetismo**. São Paulo: Pearson, 2012. 587 p.

PANZO, Jacinto. **Propagação em guias de onda**. 2014. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAgPcIAI/guias-onda#>>. Acesso em: 04 dez. 2015.

PEREIRA, José Jesus. **Caracterização eletromagnética de materiais absorvedores de microondas via medidas de permissividade e permeabilidade complexas na banda X**. 2007. 200 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Taubaté, Taubaté, 2007. Disponível em: <<http://livros01.livrosgratis.com.br/cp116089.pdf>>. Acesso em: 04 set. 2015.

PINHEIRO, Lucas Batochi. **Síntese e caracterização de compósitos de NiO-YSZ-CeO<sub>2</sub> com tratamento hidrotermal assistido por microondas**. 2013. 90 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências na área de Tecnologia Nuclear, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2013. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85134/tde-11122013-154142/pt-br.php>>. Acesso em: 30 set. 2015.

PINHO, Pedro Renato Tavares; ROCHA, Armando Carlos Domingues; FERREIRA, José Fernando da Rocha. **Propagação Guiada de Ondas Eletromagnéticas**. Rio de Janeiro: Ltc, 2014. 311 p.

PISSOLATO FILHO, José. **Ondas Guiadas**. 2012. UNICAMP. Disponível em: <[http://www.dsce.fee.unicamp.br/~pisso/ee754/Apostila Ondas Guiadas.pdf](http://www.dsce.fee.unicamp.br/~pisso/ee754/Apostila%20Ondas%20Guiadas.pdf)>. Acesso em: 06 dez. 2015.

POZAR, David M.. **Microwave Engineering**. 3. ed. United States Of America: John Wiley & Sons, 2005. 700 p.

QUADROS, Hugo Borges de. **Avaliação das características resistivas de filmes finos absorvedores de radiação eletromagnética**. 2014. 84 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Aeroespacial, Instituto Federal de Santa Catarina, Joinville, 2014.

REJAS, Patrício Enrique Bejas. **Filmes finos metálicos absorvedores de radiação eletromagnética aplicados a tecnologia furtiva**. 2014. 53 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Aeroespacial, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

ROUSSY, G.; PEARCE, J. A. **Foundations and industrial applications of microwave and radio frequency fields: physical and chemical processes**. Chichester: John Wiley & Sons, 1995.

SAAB. **Signature Management**. 2005. Disponível em: <[www.saab.se](http://www.saab.se)>. Acesso em: 5 dez. 2015.

SADIKU, Matthew N. O.. **Elementos de eletromagnetismo**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2012. 704 p.

SALLEH et al. **Experimental verification of multi-layer coconut shell-derived microwave absorbers**. 12th IEEE International RF and Microwave Conference, Seremban, Malaysia, Dez. 2011.

SALLEH, M. K.; YAHYA, Z; AWANG, W.N. **Binomial Multi-layer Coconut Shell-Based Rubber Microwave Absorber Design**. 12th IEEE International RF and Microwave Conference, Seremban, Malaysia, Dez. 2011.

SFALSIN, Antonio Fernandes. **Materiais absorvedores de radiação eletromagnética baseados em negro de fumo e papel celulósico na banda X (8,2 - 12,4 GHz)**. 2008. 114 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Taubaté, Taubaté, 2008.

SHIN, J.Y; OH, J.H. **The Microwave Absorbing Phenomena of Ferrite Microwave Absorbers**. IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 29. NO.6, Nov. 1993.

SILVA, Cirene de Andrade Prata da. **Produção de filmes finos de Kanthal absorvedores de micro-ondas**. 2014. 73 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2014.

SILVA, José Eves Mendes da. **Síntese, análise das propriedades magnéticas da ferrita de NiMg e características de absorção de radiação**. 2008. 117 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.

SILVA, Cristina Socorro da. **Balanco Mineral Brasileiro: Nióbio**. 2001. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/dnpm/paginas/balanco-mineral/arquivos/balanco-mineral-brasileiro-2001>>. Acesso em: 20 out. 2014.

SIMÕES, Roberto. **Materiais absorvedores de radiação eletromagnética na faixa de 8 a 12GHz**. 2005. 88 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Taubaté, Taubaté, 2005.

SOUZA, Danilo de. **Uso de pentóxido de nióbio para aplicação como substrato de antenas de microfita**. 2015. 161 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Sistemas de Comunicação e Automação, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2015.

SOUZA, Tânia Nogueira Fonseca. **Produção e caracterização física e mecânica de ferros fundidos nodulares e ferros fundidos nodulares austemperados com adição de nióbio.** 2012. 166 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

TAVARES, Elcio Correia de Souza. **Estudos de sinterização da mistura de pós cerâmicos diatomita-titânia.** 1993. 139 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 1993.

VIANA, Ricardo L.. **Ondas Eletromagnéticas: Segunda Parte.** 2015. UFPR. Disponível em: <<http://fisica.ufpr.br/viana/eletro/guias.pdf>>. Acesso em: 16 nov. 2015.

VICENTE, Alvaro Juliano. **Guias de onda retangulares preenchidos por múltiplas camadas de dielétricos para filtragem em microondas de 10 à 15 GHz.** 2004. 128 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

WANG et. al. **The electromagnetic property of chemically reduced graphene oxide and its application as microwave absorbing material.** Applied Physics Letters 98, 2011.

ZHANG et al. **Microwave properties of de-aggregated flake-shaped carbonyl-iron particle composites at 2-18GHz.** IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 42. NO 7, Jul. 2006.