

UNESP
Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá

Guaratinguetá

2001



1110000457



CARGO LEITOR NÃO
RISQUE O LIVRO

EFEITOS DOS ADITIVOS A BASE DE $MnO-MgO-Fe_2O_3$ EM
MANTAS ABSORVEDORAS PARA APLICAÇÃO
AEROSPAIAL

CARLOS ALBERTO REIS DE FREITAS

***"Efeitos dos Aditivos a Base de
 $MnO-MgO-Fe_2O_3$ em Mantas
Absorvedoras para
Aplicação Aeroespacial"***

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia
de Guaratinguetá da Universidade Estadual
Paulista, para obtenção do título de Doutor em
Engenharia Mecânica.

CARLOS ALBERTO REIS DE FREITAS

Orientador: Prof. Dr. Francisco Crisóstomo Laurence de Melo

Co-orientador: Prof. Dr. Alberto José de Faria Orlando

142

Guaratinguetá
2001

FACULDADE DE ENGENHARIA
DE GUARATINGUETÁ

BIBLIOTECAS

--457

CARO LEITOR NÃO
RISQUE O LIVRO

**EFEITOS DOS ADITIVOS A BASE DE $\text{MnO-MgO-Fe}_2\text{O}_3$ EM
MANTAS ABSORVEDORAS PARA APLICAÇÃO
AEROSPAIAL**

CARLOS ALBERTO REIS DE FREITAS

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia
de Guaratinguetá da Universidade Estadual
Paulista, para obtenção do título de Doutor em
Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Francisco Cristóvão Lourenço de Melo

Co-orientador: Prof. Dr. Alberto José de Faro Orlando

Guaratinguetá
2001



457
--457

24/01/02

R\$ 20,00

Doação

Ficha catalográfica preparada na Seção de Aquisição e Tratamento da Informação da Biblioteca FEG/UNESP

Freitas, Carlos Alberto Reis de

866e Efeitos dos aditivos a base de $\text{MnO} - \text{MgO} - \text{Fe}_2\text{O}_3$ em mantas absorvedoras para aplicação Aeroespacial/Carlos Alberto Reis de. Guaratinguetá, 2001.

93f.: il.; 30cm

Bibliografia: f. 81-90

Tese(doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2001

Orientador: Prof. Dr. Francisco Cristóvão Lourenço de Melo

1.Eletromagnetismo I. Título

CDU 537.8

**“EFEITOS DOS ADITIVOS A BASE DE $MnO-MgO-Fe_2O_3$ EM MANTAS
ABSORVEDORAS PARA APLICAÇÃO AEROESPACIAL”**

CARLOS ALBERTO REIS DE FREITAS

**ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA”**

**ESPECIALIDADE: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PROJETOS E MATERIAIS**

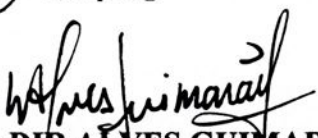
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

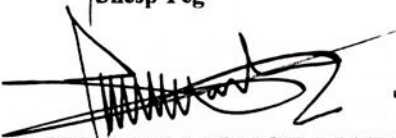

Prof. Dr. José Luz Silveira
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. FRANCISCO CRISTOVÃO LOURENÇO DE MELO
Orientador / Unesp-Feg


Prof. Dr. LUIS ROGERIO DE OLIVEIRA HEIN
Unesp-Feg


Prof. Dr. VALDIR ALVES GUIMARÃES
Unesp-Feg


Prof. Dr. INACIO MALMONGE MARTIN
UNICAMP


Prof. Dr. ANTONIO CARLOS DA CUNHA MIGLIANO
CTA

Maio de 2001

DADOS CURRICULARES

CARLOS ALBERTO REIS DE FREITAS

NASCIMENTO	09/01/1958- ITANHANDÚ/ MG
FILIAÇÃO	Sebastião de Freitas Euridisi Reis de Freitas
1977/1984	Curso de Graduação-Engenharia Elétrica Escola Federal de Engenharia de Itajubá -EFEI
1989/1990	Curso de Pós Graduação em Engenharia de software, a nível de especialização na Universidade do Vale do Paraíba -UNIVAP
1993/1995	Curso de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, nível de Mestrado, na Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI.
1998/2001	Curso de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Doutorado na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da UNESP

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela esperança, pela orientação dos caminhos nos momentos difíceis.

Ao Prof. Dr. Francisco Antônio Lourenço de Sá e ao Prof. Dr. Alberto José de Faria Orlando, meus orientadores, pela atenção e dedicação.

Ao AMIL, Divisão de Máquinas de CTA, e aos técnicos do Laboratório de Exatidão, que contribuíram com este trabalho.

Aos meus pais , Sebastião e Euridisi

Pelo carinho,

Pela compreensão...

Ao Prof. Dr. Antônio Carlos de Sá, pelo apoio na utilização do Laboratório de Sistemas Eletromagnéticos do IEA, Instituto de Estudos Avançados, na elaboração

Ao meu filho adorado Anderson (Andi)

Um sonho,

Uma realização...

Ao Prof. Yasmara Conceição De Faria, pela revisão do texto.

A todos, parentes e amigos do Departamento de Materiais e Tecnologia de São Carlos/SP pela ajuda e cooperação.

Aos amigos da ADIA/IAF, pelo incentivo e amizade.

A cidade de Guararapuá.

E a todos que me ajudaram.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela esperança, pela orientação dos caminhos nos momentos difíceis;

Ao Prof. Dr. Francisco Cristóvão Lourenço de Melo e ao Prof. Dr. Alberto José de Faro Orlando, meus orientadores, pelo carinho e dedicação;

Ao AMR, Divisão de Materiais do CTA, e aos técnicos do Laboratório de Cerâmica, que contribuíram com este trabalho;

Ao Prof. Dr. Antonio Carlos da Cunha Migliano, pelo apoio na utilização do Laboratório de Sistemas Eletromagnéticos do IEAv, Instituto de Estudos Avançados, na elaboração dos corpos de provas;

A Pesq. Yasmara Conceição De Polli, pela revisão do texto;

A todos funcionários e amigos do Departamento de Materiais e Tecnologia da FEG/UNESP pela ajuda e cooperação;

Aos amigos da ADA/IAE, pelo incentivo e amizade;

A cidade de Guaratinguetá;

E a todos que me ajudaram.



SUMÁRIO

LISTAS DE FIGURAS

LISTAS DE TABELAS

LISTA DE SÍMBOLOS E NOMENCLATURAS

Resumo

Abstract

- 1.1 “Grande sabedoria é não ser precipitado nas ações, nem aferrado
1.1 obstinadamente à sua opinião; sabedoria é também não acreditar
1.2 o que nos dizem, nem comunicar logo a outros o que ouvimos
1.3 ou suspeitamos”

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Magnetismo *Thomas de Kemphis*

2.2 Ferromagnetismo

2.3 Materiais magnéticos metálicos

2.3.1 Materiais magnéticos moles

2.3.2 Materiais magnéticos duros

2.4 Materiais magnéticos cerâmicos

2.4.1 Cerâmicas magnéticas de baixa condutividade

2.5 Propriedades do eletro pelicular (“skin”)

2.6 Cálculo do eletro pelicular (“skin”)

2.7 Estudos de materiais magnéticos para regime de banda-A

de microondas

2.7.1 Ondas de ondas eletromagnéticas

SUMÁRIO

LISTAS DE FIGURAS

LISTAS DE TABELAS

LISTA DE SÍMBOLOS E NOMENCLATURAS

Resumo

Abstract

1 INTRODUÇÃO

1.1 Aspectos gerais..... 1

1.2 Objetivos e justificativa 2

1.3 Definições e histórico..... 2

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... 4

2.1 Magnetismo..... 4

2.2 Ferromagnetismo..... 7

2.3 Materiais magnéticos metálicos..... 11

2.2.1 Materiais magnéticos moles..... 12

2.2.2 Materiais magnéticos duro..... 13

2.4 Materiais magnéticos cerâmicos..... 14

2.4.1 Cerâmicas magnéticas de baixa condutividade..... 14

2.5 Propriedades do efeito pelicular(“skin”)..... 15

2.6 Cálculo do efeito pelicular(“skin”)..... 16

2.7 Estudos de materiais magnéticos para região de banda-X
de microondas..... 18

2.7.1 Guias de ondas eletromagnéticas..... 18

2.7.2 Cavidades retangulares.....	19
2.8 Características das ferritas cerâmicas.....	21
2.9 Fases cerâmicas e suas propriedades.....	22
2.9.1 Estrutura cristalina das fases cerâmicas.....	22
2.9.2 Materiais cerâmicos ferriéletricos.....	23
2.10 Materiais cerâmicos magnéticos.....	26
2.11 Comportamento eletromagnético dos materiais cerâmicos.....	27
2.12 Estrutura das ferritas cerâmicas.....	28
2.12.1 Ferrita de estrutura spinélio.....	29
2.12.2 Ferrita de estrutura hexagonal.....	30
2.12.3 Ferrita de estrutura granada.....	31
2.13 Características elétricas de ferritas em altas frequências.....	33
3 MÉTODOS, PROCESSOS DE FABRICAÇÃO E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	37
3.1 Introdução.....	37
3.2 Composição MnO-MgO-Fe ₂ O ₃	37
3.3 Processo de fabricação MnO-MgO-Fe ₂ O ₃	38
3.4 Cálculos para construção da cavidade ressonante.....	40
3.5 Resultados.....	42
3.6 Caracterização pelo efeito pelicular (“skin”) ferritas cerâmicas a base de mno- mgo-fe ₂ o ₃ para operação em frequências na banda-x.....	45
3.7 Processo de fabricação do aditivo MgO-MnO-Fe ₂ O ₃	49
3.7.1 Composição e fabricação da ferrita MgO- MnO-Fe ₂ O ₃ , na forma de pó, para ser utilizada na forma de resina epóxi.....	49
3.7.2 Composição e fabricação da ferrita MgO-MnO-Fe ₂ O ₃	50

LISTAS DE FIGURAS

3.7.2.1 Formulação da ferrita.....	50
3.7.2.2 Mistura do pó de ferrita $\text{MgO-MnO-Fe}_2\text{O}_3$	51
3.7.2.3 Secagem em estufa.....	51
3.7.2.4 Micronização.....	53
3.7.2.5 Pré-queima da mistura.....	54
3.7.2.6 Sinterização.....	56
3.8 Processo de fabricação da manta eletromagnética com resina epóxi.....	58
3.8.1 Composição das amostras das mantas.....	60
3.8.2 Densidade da ferrita.....	61
3.8.3 Cálculo da composição da resina epóxi.....	61
3.8.4 Composição final da massa.....	63
3.9 Ensaios e análise de resultados.....	67
3.9.1 Instrumentação.....	67
3.9.2 Método do arco NRL.....	67
3.9.3 Os ensaios das mantas absorvedoras	69
3.9.4 Testes realizados na mantas absorvedoras.....	70
4 RESULTADOS.....	71
4.1 Testes realizados nas mantas absorvedoras(resultados).....	71
4.2 Discussões dos resultados.....	77
5 CONCLUSÕES.....	79
5.1 Conclusões.....	79
5.2 Sugestões para trabalhos futuros.....	80
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	81
APÊNDICES.....	91

FIGURA 2.20 – Unidade de estrutura de célula $\text{MgO-Fe}_2\text{O}_3$32

FIGURA 2.31 – Estrutura da unidade de célula da ferrita YIG32

LISTAS DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – Um material magnético gerando um campo magnético por meio de uma corrente elétrica.....	4
FIGURA 2.2 – Propriedades do magnetismo em uma curva de indução BXH	5
FIGURA 2.3 – Curva de Histerese.....	8
FIGURA 2.4 – Estrutura eletrônica de orbital 3d para metais.....	9
FIGURA 2.5 – Alinhamento dos momentos magnéticos para átomos adjacentes.....	10
FIGURA 2.6 – Estrutura do domínio de um cristal não magnetizado.....	11
FIGURA 2.7 – Magnetização inicial.....	11
FIGURA 2.8 – Materiais Magnéticos Mole e Duro.....	12
FIGURA 2.9 – Profundidade de penetração em relação a frequência.....	15
FIGURA 2.10 – Fluxo através de uma lamina de espessura a	17
FIGURA 2.11 – Secção retangular do guia de onda do modo de transmissão TE.....	20
FIGURA 2.12 – Estrutura cerâmica cristalina MgO	23
FIGURA 2.13 – Deslocamento iônicos em um campo elétrico.....	24
FIGURA 2.14 – Exemplo de estrutura $BaTiO_3$	24
FIGURA 2.15 – Domínios ferrielétricos.....	25
FIGURA 2.16 – Histerese ferrielétrica.....	26
FIGURA 2.17 – Ferromagnetismo no $NiFe_2O_4$	27
FIGURA 2.18 – Estrutura celular de uma ferrita do tipo spinélio.....	29
FIGURA 2.19 – Composição hexagonal da ferrita a base $Ba-O-MeO Fe_2O_3$	31
FIGURA 2.20 – Unidade de estrutura de célula $M^{++}Fe_{12}O_{19}$	32
FIGURA 2.21 – Estrutura da unidade de célula da ferrita YIG.....	32

FIGURA 3.1 – Diagrama de fases MnO-MgO-Fe ₂ O ₃	39
FIGURA 3.2 – Geometria final da amostra.....	39
FIGURA 3.3 – Etapas do processo de fabricação.....	40
FIGURA 3.4 – Cavidade ressonante.....	42
FIGURA 3.5 – Esquema de instrumentação utilizado.....	43
FIGURA 3.6 – Instrumentação para medição.....	44
FIGURA 3.7 – Moinho de bolas para mistura do pó.....	51
FIGURA 3.8 – Amostra após o descarregamento.....	52
FIGURA 3.19 – Estufa para secagem.....	52
FIGURA 3.10 – Mistura após secagem.....	53
FIGURA 3.11 – Micronizador de partículas.....	54
FIGURA 3.12– Forno programável com injeção de oxigênio.....	55
FIGURA 3.13 – Diagrama da temperatura para o pré-queima.....	55
FIGURA 3.14 –Diagrama de temperatura de operação de sinterização.....	57
FIGURA 3.15 – Produto final do pó de ferrita.....	60
FIGURA 3.16 – Forno de cozimento.....	65
FIGURA 3.17 – Mantas com dimensões 320mmx445mmx2mm.....	66
FIGURA 3.18 – Mantas com as dimensões 320mmx445mmx2mm	66
FIGURA 3.19.– Arco NRL utilizado para medidas de refletividade.....	68
FIGURA 3.20 – Interior de câmara anecóica	69
FIGURA 4.1 – Corpo-de-prova 1- lado liso –manta 1.....	71
FIGURA 4.2 – Corpo-de-prova 1 – lado rugoso –manta 1.....	72
FIGURA 4.3 –Corpo-de-prova 2-lado liso – manta 2.....	73
FIGURA 4.4 – Corpo-de-prova 2- lado rugoso – manta 2.....	73
FIGURA 4.5 – Corpo-de-prova 3-lado liso – manta 3.....	74
FIGURA 4.6 – Corpo-de-prova 3 – lado rugoso – manta 3.....	74
FIGURA 4.7 – Corpo-de-prova 4 – lado liso – manta 4.....	76
FIGURA 4.8 – Corpo-de-prova 4 – lado rugoso – manta 4.....	76

LISTAS DE TABELAS

TABELA 2.1 – Tipos de magnetismo classificados conforme a orientação dos momentos magnéticos dos materiais6

TABELA 2.2 – Propriedades dos materiais magnéticos mole14

TABELA 2.3 – Máximo produto $B \times H$ para metais magnéticos duros.....13

TABELA 2.4 – Propriedades de certas ferritas granada.....33

TABELA 2.5 – Propriedades elétricas das ferritas.....34

TABELA 2.6 – Propriedades elétricas das ferritas em microondas35

TABELA 3.1 – Composição do pó de ferrita38

TABELA 3.2 – Medidas obtidas de frequências.....45

TABELA 3.3 – Resultados finais obtidos pelo cálculo das equações do elemento pelicular.....48

TABELA 3.4 – Tabela inicial de formulação da ferrita dentro da região de absorção.....50

TABELA 3.5 – Dados orientativos DY 5601 Fabricante CIBA58

TABELA 3.6 – Dados orientativos GY 298 Fabricante CIBA Pesos dos componentes da resina.....59

TABELA 3.7 – Dados orientativos HY 840 Fabricante CIBA59

TABELA 3.8 – Composição das resinas60

TABELA 3.9 – Pesos dos componentes da resina61

TABELA 3.10 – Densidade das amostras61

TABELA 3.12 – Composição epóxi nas mantas com dimensões 320mmx45mmx1mm62

TABELA 3.12 – LISTAS DE TABELAS

TABELA 2.1 – Tipos de magnetismo classificados conforme a orientação dos momentos magnéticos dos materiais.....	6
TABELA 2.2 – Propriedades dos materiais magnéticos mole.....	14
TABELA 2.3 – Máximo produto BxH para metais magnéticos duro.....	13
TABELA 2.4 – Propriedades de certas ferritas granada.....	33
TABELA 2.5 – Propriedades elétricas das ferritas.....	34
TABELA 2.5 – Propriedades elétricas das ferritas em microondas	35
TABELA 3.1 – Composição do pó de ferrita	38
TABELA 3.2 – Medidas obtidas de frequências.....	45
TABELA 3.3 – Resultados finais obtidos pelo cálculo das equações do efeito pelicular.....	48
TABELA 3.4 – Tabela inicial de formulação da ferrita dentro da região de absorção.....	50
TABELA 3.5 – Dados orientativos: DY 3601 Fabricante CIBA	58
TABELA 3.6 – Dados orientativos: GY 298 Fabricante CIBA Pesos dos componentes de resina.....	59
TABELA 3.7 – Dados orientativos: HY 840 Fabricante CIBA.....	59
TABELA 3.8 – Composição das resinas.....	60
TABELA 3.9 – Pesos dos componentes da resina.....	61
TABELA 3.10 – Densidade das amostras.....	61
TABELA 3.12 – Composição epóxi nas mantas com dimensões 320mmx445mmx1mm.....	62

TABELA 3.13 – Composição epóxi nas mantas com dimensões 320mmx445mmx2mm.....	63
TABELA 3.14 – Composição das mantas com dimensões 320mmx445mmx2mm.....	64
TABELA 3.13 – Composição nas mantas com dimensões 320mmx445mmx2mm.....	64

AB₂O₃ - Estrutura ferrita spinello

MeO - Óxido metálico

Y₂Fe₂O₇ - Estrutura ferrita granada

ITA - Instituto Tecnológico de Aeronáutica

AMR - Centro de Materiais

TE - modo transversal de propagação no guia de onda

IFI - Instituto de Fomento e Condensação Industrial

NF - Negro de Fumo

NRL - Naval Research Laboratory

EMI - Interferência Eletromagnética

EMC - Compatibilidade Eletromagnética

LOG - Logaritmo Decimal

HF - Alta Frequência

RTN - Radar Cross Section

T_c - Temperatura crítica

LISTAS DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CTA - Centro Técnico Aeroespacial

IAE-Instituto de Aeronáutica e Espaço

IEAv –Instituto de Estudos Avançados

AB_2O_4 -Estrutura ferrita spinélio

MeO – Oxido metálico

$Y_3Fe_5O_{15}$ - Estrutura ferrita granada

ITA- Instituto Tecnológico de Aeronáutica

AMR- Divisão de Materiais

TE - modo transversal de propagação no guia de onda

IFI – Instituto de Fomento e Coordenação Industrial

NF - Negro de Fumo

NRL - Naval Research Laboratory

EMI - Interferência Eletromagnética

EMC- Compatibilidade Eletromagnética

LOG - Logaritmo Decimal

HF - Alta Frequência

RCS - Radar Cross Section

T_c - Temperatura crítica

B_s - densidade de fluxo de saturação

B_r - fluxo remanente

MPa - Megapascal

B_0 -fluxo coercitivo

P - fator de Poynting

Δf - variação de frequência



LISTAS DE SIMBOLOS

π constante 3,14159....

Hz-Hertz – unidade de frequência

f - frequência [Hz]

f_c -frequência crítica. [Hz]

λ_0 . comprimento de onda no espaço livre [m]

ω - frequência angular [rd/s]

ρ - resistividade [Ωm]

ξ - fator penetração.

δ - profundidade de fluxo

ε - permissividade

ε_0 -permissividade no vácuo

μ - permeabilidade

μ_0 - permeabilidade magnética do vácuo= $4\pi \cdot 10^{-12}$ [Farads/metro]

μ_i - permeabilidade do corpo-de-prova

μm - dimensões de partículas

H -campo magnético [A/m]

B - densidade de fluxo magnético [Vs/m^2]

B_s - densidade de fluxo de saturação

B_r - fluxo remanente

MPa - Megapascal

B_c - fluxo coercitivo

P - vetor de Poynting [W/m]

Δf - variação de frequência [Hz]

V_s - volume da amostra	$[m^3]$
V-volume cavidade ressonante	$[m^3]$
c -velocidade da luz 3.10^8 m/s	
f_o - frequência de ressonância da cavidade	$[Hz]$
T_c - temperatura crítica	$[^{\circ}C]$
K- constante em função das características do material adimensionalizada	
a - maior dimensão da cavidade ressonante	$[mm]$
R- resistência elétrica	$[\Omega]$
L- comprimento	$[m]$
A-área da secção transversal	$[m^2]$
Kg - quilograma	
rpm- rotações por minuto	
$^{\circ}C/h$ -taxa de temperatura	
Ni -Níquel	
Co- cobalto	
Cu -Cobre	
Fe_2O_2 - Óxido de ferro	
MgO- óxido de magnésio	
MnO- óxido de manganês	
ZnS - sulfeto de zinco	
Ba-bário	
Ti -titanô	
O- oxigênio	
Mg-magnésio	
Mn-manganês	
Fe-ferro	
Ni-níquel	
dB –decibel	

FREITAS, C.A. R. *Efeitos dos aditivos a base de $MnO-MgO-Fe_2O_3$ em mantas absorvedoras para aplicação aeroespacial.* Guaratinguetá.

2001, 121p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica)- Faculdade de Engenharia, Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo estabelecer metodologia de processamento de mantas absorvedoras com aditivos à base de $MnO-MgO-Fe_2O_3$, em resinas epóxi, para aplicação no setor aeroespacial.

Foram desenvolvidos nova composição e processo de fabricação de ferritas no sistema $MnO-MgO-Fe_2O_3$, para operar em banda-X do espectro de microondas, a serem utilizadas em experimentos no IAE (Instituto de Aeronáutica e Espaço) do CTA (Centro Técnico Aeroespacial).

Foram testados vários processos de fabricação e formulações de ferritas, até que se chegasse a um produto de qualidade, para uso na fabricação de mantas absorvedoras.

Fabricaram-se várias mantas absorvedoras à base de resina epóxi, para serem usadas nas frequências de 8-12 GHz. Foi usada a metodologia de medidas do arco NRL (Naval Research Laboratory), para caracterização de níveis de absorção das mantas.

Os corpos-de-prova foram fabricados nos Laboratórios de Cerâmica da AMR (Divisão de Materiais do IAE) e Sistema Eletromagnético do IEAv (Instituto de Estudos Avançados) e as medidas de níveis de absorção foram feitas na Divisão de Confiabilidade Metrológica do IFI (Instituto de Fomento e Coordenação Industrial).

Pelos resultados observados nos testes realizados para aplicações de uso no setor aeroespacial, conclui-se que os aditivos Mg-Mn quando usados nas mantas elaboradas em resina epóxi têm um bom nível de absorção.

Engenharia, Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista

PALAVRAS-CHAVE: ferritas cerâmicas, aditivo $\text{MnO-MgO-Fe}_2\text{O}_3$, mantas absorvedoras.

The objective of this work is the processing and characterization of absorbent blankets of epoxy resins with addition of $\text{MnO-MgO-Fe}_2\text{O}_3$ for aerospace applications.

A new process of ferrite production was developed, using $\text{MnO-MgO-Fe}_2\text{O}_3$ formulation that operates in the microwave X-band, to be used in experiments at IAE/CTA (Instituto de Aeronáutica e Espaço /Centro Técnico Aeroespacial).

Several production processes and various ferrite formulations were investigated in order to obtain a product with quality for the production of absorbent blankets.

Several epoxy resins based absorbent blankets were manufactured for frequency range between 8 and 12 GHz. The measurements of NRL (Naval Research Laboratory), and RCS (Radar Cross Section) methodologies were applied for the characterization of the absorption levels at the blankets.

The samples were manufactured at the ceramics laboratory of the AMR (Divisão de Materiais do IAE), and the electromagnetics laboratory at IEAv (Instituto de Estudos Avançados). The measurements of the absorption levels were made at Absorption and Frequency Laboratory, of Div AF1 (Divisão de Eletrônica do IAE).

FREITAS, C.A. R. *Effects of additives to the base of MnO-MgO-Fe₂O₃ in absorbing blankets for aerospace applications.* Guaratinguetá, 2001.

xpp. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista

Keywords: ceramics ferrites, MnO-MgO-Fe₂O₃ addition,

ABSTRACT

The objective of this work is the processing and characterization of absorbent blankets of epoxy resins with addition of MnO-MgO-Fe₂O₃, for aerospace applications.

A new process of ferrite production was developed, using MnO-MgO-Fe₂O₃ formulation that operates in the microwave X-band, to be used in experiments at IAE/CTA (Instituto de Aeronáutica e Espaço /Centro Técnico Aeroespacial).

Several production processes and various ferrite formulations were investigated in order to obtain a product with quality for the production of absorbent blankets.

Several epoxy resins based absorbent blankets were manufactured, for frequency range between 8 and 12 GHz. The measurements of NRL (Naval Research Laboratory), and RCS (Radar Cross Section) methodologies were applied for the characterization of the absorption levels of the blankets.

The samples were manufactured at the ceramics laboratory of the AMR (Divisão de Materiais do IAE), and the electromagnetics laboratory at IEAv (Instituto de Estudos Avançados). The measurements of the absorption levels were made at Absorption and Frequency Laboratory, of the AEL (Divisão de Eletrônica do IAE).

It is concluded, from the results obtained that the additions have excellent performance in the blankets, relative to the absorption level, from what a characterization pattern was defined for aerospace use.

Keywords: ceramics ferrites, $\text{MnO-MgO-Fe}_2\text{O}_3$ addition, absorbent blankets

Os trabalhos de pesquisa voltados às necessidades crescentes de obtenção de novos materiais com excelentes propriedades elétricas e de absorção de ondas eletromagnéticas, contribuem cada vez mais para o desenvolvimento de blindagens de equipamentos eletrônicos no setor aeroespacial.

No início das pesquisas visava-se à fabricação de uma ferrita cerâmica para a aplicação em aeronaves com finalidade de não detecção de radar. Foi feito o gráfico composicional de um diagrama ferrítico junto a um aditivo Mn-Mg para se obter a característica absorvedora na banda de microondas. Em razão disto o material escolhido foi o $\text{MgO-MnO-Fe}_2\text{O}_3$ onde sob o estudo de suas propriedades físicas e químicas relevantes são as altas taxas de absorção de ondas eletromagnéticas na faixa de GHz e baixa custo.

A pesquisa, no entanto, envolveu uma metodologia de fabricação de aditivo $\text{MgO-MnO-Fe}_2\text{O}_3$ em que foram feitas medidas de permeabilidade magnética utilizando a técnica de espina pelicular e determinando assim o grau de desempenho em relação à absorção de ondas eletromagnéticas. O método utilizado para avaliar a absorção foi o método de coeficiente de reflexão.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 - ASPECTOS GERAIS

Os trabalhos de pesquisa, voltados às necessidades crescentes de obtenção de novos materiais com excelentes propriedades elétricas e de absorção de ondas eletromagnéticas, contribuem cada vez mais para o desenvolvimento de blindagens de equipamentos eletrônicos no setor aeroespacial.

No início das pesquisas visava-se à fabricação de uma ferrita cerâmica para a aplicação em aeronaves com finalidade de não detecção de radar. Ela seria o terceiro componente de um diagrama ternário junto a um aditivo Mn-Mg para se obter a característica absorvedora na banda-X de microondas. Em razão disto, o material escolhido foi à base de óxidos como $\text{MgO-MnO-Fe}_2\text{O}_3$, cujas características relevantes são os altos níveis de absorção de ondas eletromagnéticas na faixa de GHz a baixo custo.

A pesquisa, no entanto, envolveu uma nova metodologia de fabricação do aditivo $\text{MgO-MnO-Fe}_2\text{O}_3$, em que foram feitas medidas de permeabilidade magnética utilizando a técnica do efeito pelicular e determinando assim o grau de desempenho em relação à absorção de ondas eletromagnéticas. O método utilizado para realizar estas medidas foi o método da cavidade ressonante



1.2 – OBJETIVOS E JUSTIFICATIVA

Este trabalho tem como principal objetivo desenvolver um processo de fabricação do aditivo $\text{MgO-MnO-Fe}_2\text{O}_3$ como elemento utilizado na composição de mantas absorvedoras à base de resina epóxi.

Serão analisadas quatro composições de mantas, verificando-se níveis de absorção de ondas eletromagnéticas usando o método NRL.

As ferritas de composição $\text{MgO-MnO-Fe}_2\text{O}_3$ são um material adequado para uso em frequências da banda-X, por apresentarem boas propriedades elétricas e magnéticas, para este intervalo de frequência.

Devido a sua alta resistência elétrica, baixo custo, baixas perdas, facilidade de fabricação e pelo fato de absorver ondas eletromagnéticas, usou-se esta composição de aditivo na fabricação de mantas absorvedoras à base de resina epóxi.

Testes comprovaram a absorção de ondas eletromagnéticas pelas mantas, as quais estão sendo pesquisadas para aplicação no uso de blindagens de equipamentos eletrônicos embarcados em veículos lançadores.

A fabricação e os ensaios de refletividade dos corpos-de-prova foram realizados nos laboratórios dos seguintes institutos: CTA/IAE, CTA/IEAv, CTA/ITA e CTA/IFI.

1.3-DEFINIÇÕES E HISTÓRICO

Face à crescente necessidade de novos materiais para atender às mais diversas solicitações de novas tecnologias que foram surgindo no decorrer do século XX, houve a necessidade de se aplicar técnicas de produção convencionais, de forma mais aprimorada (Sakiots et al, 1953).



Pesquisas de novas metodologias de fabricação de cerâmicas com melhor grau de pureza, produziram à classe de materiais magnéticos, levando a uma multiplicidade de novos materiais, e à inserção das mais diversas matérias primas na indústria de material cerâmico.

A classe de ferritas cerâmicas vem sendo objeto de estudo desde a década de 40, visando aplicações eletromagnéticas. Nesses casos, os aditivos de ferritas Mn-Mg têm aplicações em microondas em razão de sua alta resistência elétrica (10^8 - $10^{10} \Omega$), de modo a permitir a penetração das ondas eletromagnéticas no corpo do material. Albers&Shoenberg (1954) mostraram o desempenho desses aditivos em microondas utilizando o sistema MnO-MgO-Fe₂O₃. Esta composição de aditivos de ferritas foi pesquisada por Fresh (1966), Ljung (1957), Roberts (1951), Sakiots & Chait (1953) que comprovaram que o desempenho da formulação deste aditivo para faixa de banda-X de microondas tem bons níveis de absorção em torno de 9,5 GHz. Este fato deu início às pesquisas dos aditivos Mg-Mn para serem utilizados em mantas absorvedoras à base de resinas epóxi.

FIGURA 2.1 – Um “material magnético” gerando um campo magnético por meio de uma corrente elétrica (Edminister, 1982).

Alguns materiais apresentam características magnéticas e têm um campo magnético conforme foi apresentado na Figura 2.1 e, neste caso, existe uma identificação de dipolo N(norte) e S(sul), existindo assim, uma atração adjacente, por onde são atraídas as partes de dipolos, sendo isso uma característica de um fenômeno do ferromagnetismo.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1- MAGNETISMO

Mostra-se na Figura 2.1 um simples exemplo de um fenômeno magnético, onde uma corrente circular gera um campo magnético. O valor da magnitude e direção do campo magnético é função do vetor campo magnético H .

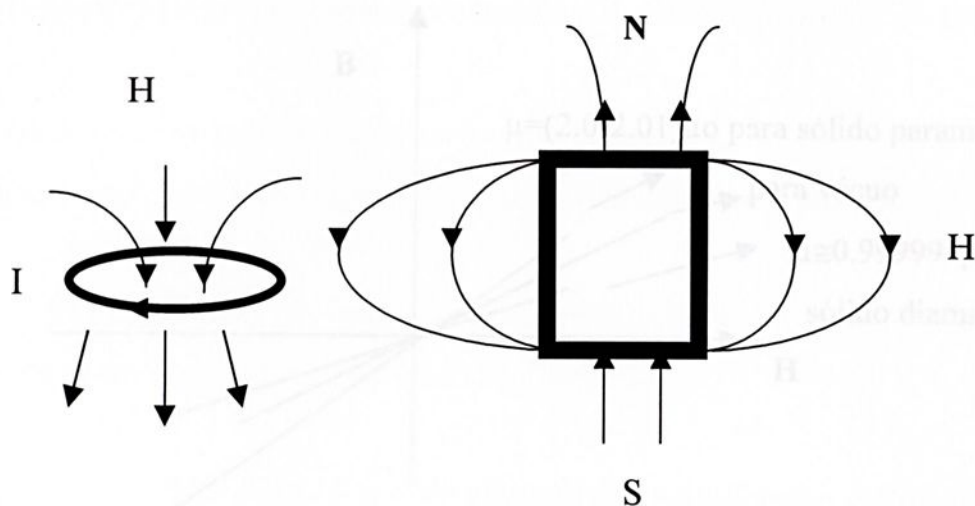


FIGURA 2.1 – Um “material magnético” gerando um campo magnético por meio de uma corrente elétrica (Ediminister, 1982).

Alguns materiais apresentam características magnéticas e têm um campo magnético conforme foi apresentado na Figura 2.1 e, neste caso, existe uma identificação de dipolo N(norte) e S(sul), existindo assim, uma atração adjacente, por onde são submetidos os pares de dipólos, sendo isto uma característica de um fenômeno do ferromagnetismo.

A princípio a presença de uma corrente I , gera um vetor H . Devido a isto, a equação $B = \mu_0 H$, para o vácuo torna-se $B = \mu_0 (H + M)$, para meios materiais, onde M é o vetor magnetização.

Em relação aos materiais, alta condutividade e boa permeabilidade, são os parâmetros que caracterizam o fenômeno de diamagnetismo e o paramagnetismo. Na Figura 2.2, ilustram-se as curvas de classificação dos materiais em relação ao magnetismo (paramagnético, diamagnético e vácuo).

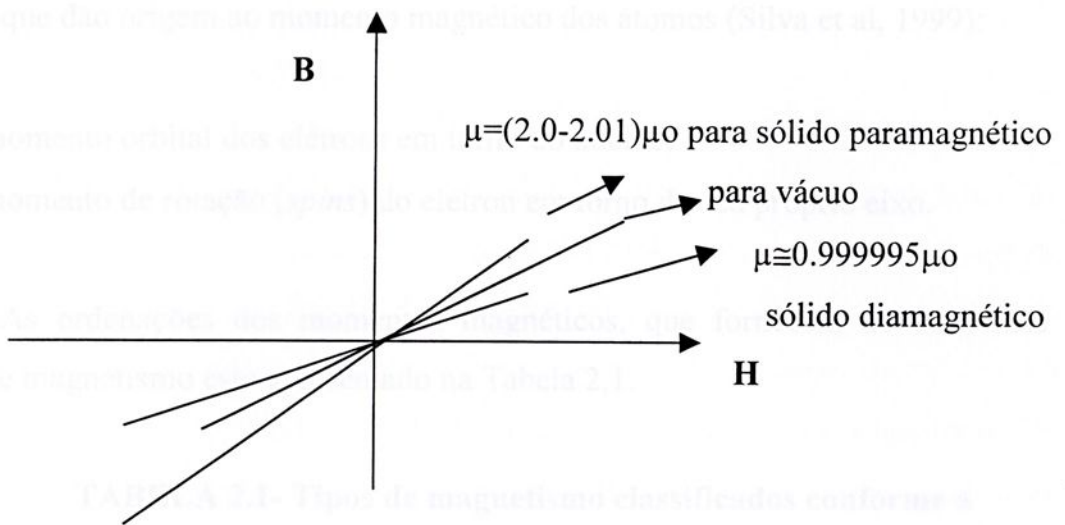


FIGURA 2.2 –Propriedades do magnetismo em uma curva de indução $B \times H$ (Callister, 1994)

Propriedades magnéticas dos materiais

- O magnetismo está relacionado à existência dos momentos magnéticos atômicos, o que ocasiona uma influência no nível magnético dos elementos,
- A existência de interações entre os momentos magnéticos estabelece o nível de relação de atração entre os spins,

As propriedades magnéticas citadas estão relacionadas com o ordenamento dos momentos magnéticos dos átomos que constituem o material. Existem duas fontes que dão origem ao momento magnético dos átomos (Silva et al, 1999):

- o momento orbital dos elétrons em torno do núcleo; e
- o momento de rotação (*spins*) do elétron em torno de seu próprio eixo.

As ordenações dos momentos magnéticos, que fornecem os diferentes tipos de magnetismo esta apresentado na Tabela 2.1.

TABELA 2.1- Tipos de magnetismo classificados conforme a orientação dos momentos magnéticos dos materiais (Okamura & Torizulka, 1951).

Ordenamento	Orientação dos momentos magnéticos
Paramagnético	
Ferromagnético	
Antiferromagnético	
Ferrimagnético	

Todos os materiais ferromagnéticos e ferrimagnéticos são caracterizados pelo efeito de histerese, sendo uma relação não-linear entre um campo magnético aplicado $\mathbf{H}$ e a indução magnética $\mathbf{B}$ do material apresentado. Consequentemente, são de grande importância as propriedades associadas a este efeito: permeabilidade magnética, saturação de magnetização, forças coercitivas, etc.

Nos materiais ferromagnéticos, os vetores momentos magnéticos dos elétrons constituintes estão alinhados paralelamente, logo o momento resultante se torna diferente de zero (Hogan, 1952).

2.2 – FERROMAGNETISMO

O ferromagnetismo de certos materiais é caracterizado pelo conteúdo de ferro e metais em sua composição. A Figura 2.3 mostra uma curva não linear de campo magnético $\mathbf{H}$ em função da indução $\mathbf{B}$. Quando $B=0$, o material está desmagnetizado. As características da curva do laço de histerese da Figura 2.3 variam em função da estrutura e da escala atômica do material. Modelos estudados mostram que a posição magnética do spin na estrutura atômica contribui fortemente para a natureza magnética do material e este caso está ilustrado na Figura 2.4.

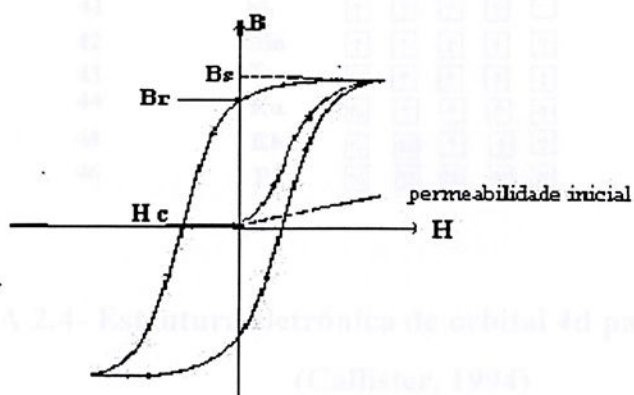


FIGURA 2.3- Curva de Histerese(Callister, 1994)

Na Figura 2.3, os parâmetros B_s , B_r e H_c são identificados como:

B_s – indução de saturação

B_r – indução remanente

H_c – campo magnético crítico

número atômico	elemento	estrutura eletrônica 4d	momento (μ_B)
39	Y	$\uparrow \square \square \square \square$	1
40	Zr	$\uparrow \uparrow \square \square \square$	2
41	Nb	$\uparrow \uparrow \uparrow \uparrow \square$	4
42	Mo	$\uparrow \uparrow \uparrow \uparrow \uparrow$	5
43	Tc	$\uparrow \downarrow \uparrow \uparrow \uparrow$	4
44	Ru	$\uparrow \downarrow \uparrow \uparrow \uparrow$	3
45	Rh	$\uparrow \downarrow \uparrow \uparrow \uparrow$	2
46	Pd	$\uparrow \downarrow \uparrow \downarrow \uparrow$	0

FIGURA 2.4- Estrutura eletrônica de orbital 4d para metais

(Callister, 1994)

Nota-se na Figura 2.4 que os elementos dos grupos IA e IIB da tabela periódica são mais eletronegativos do que os dos grupos IB e IIB, onde ocorrem, no caso, maiores induções magnéticas. Na estrutura eletrônica do orbital 4d, cada par de elétron tem uma influência em uma simples magnetização de Bohr, implicando assim, que o fenômeno do ferromagnetismo está associado com os metais de transição da tabela periódica (Callister, 1994).

Observa-se nos metais que, na transição dos átomos, podem ocorrer altos valores de indução em átomos adjacentes localizados na estrutura cristalina (Callister, 1994). Então tem-se os momentos dos dipólos no cristal, como ilustrado na Figura 2.5.

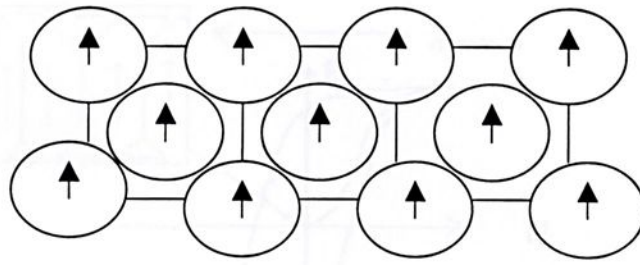


FIGURA 2.5 – Alinhamento dos momentos magnéticos para átomos adjacentes (Callister, 1994)

A Figura 2.6 ilustra uma situação de um alto valor de indução (B_s) e a posição dos que são domínios da microestrutura dos grãos cristalinos de um metal não magnetizado. Quando a microestrutura é submetida à orientação de um campo aplicado, ocorre então uma alteração nos domínios de polarização da microestrutura cristalina como ilustrado na Figura 2.7.

FIGURA 2.7 – Magnetização inicial (Callister, 1994)

2.3 – MATERIAIS MAGNÉTICOS METÁLICOS

Existe uma classe dos materiais ferromagnéticos, que são materiais magnéticos metálicos, e eles são divididos em duas categorias: moles e duros. Na Figura 2.8 estão ilustradas as estruturas dos “loops” destas categorias.

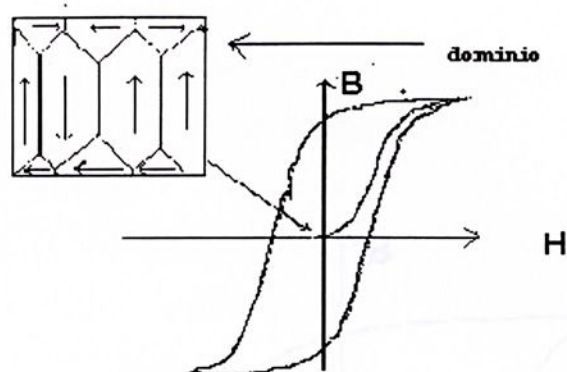


FIGURA 2.6.-Estrutura do domínio de um cristal não magnetizado (Callister, 1994)

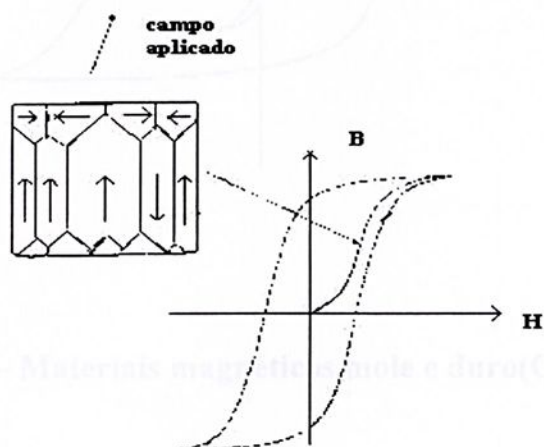


FIGURA 2.8- Materiais magnéticos moles e duros (Callister, 1994)

2.3.1- MATERIAIS MAGNÉTICOS MOLES

FIGURA 2.7 – Magnetização inicial (Callister, 1994)

Usualmente são aplicados em sistemas de potência para corrente alternada com 50 e 60 Hz. Usualmente são aplicados em sistemas de potência para corrente alternada com 50 e 60 Hz. Usualmente são aplicados em sistemas de potência para corrente alternada com 50 e 60 Hz.

2.3 – MATERIAIS MAGNÉTICOS METÁLICOS

Existente uma classe dos materiais ferromagnéticos, que são materiais magnéticos metálicos, e eles estão divididos em duas categorias: moles e duros. Na Figura 2.8 estão ilustradas as estruturas dos “loops” destas categorias.

TABELA 2.2 – Propriedades dos materiais magnéticos moles
(Callister,1994)

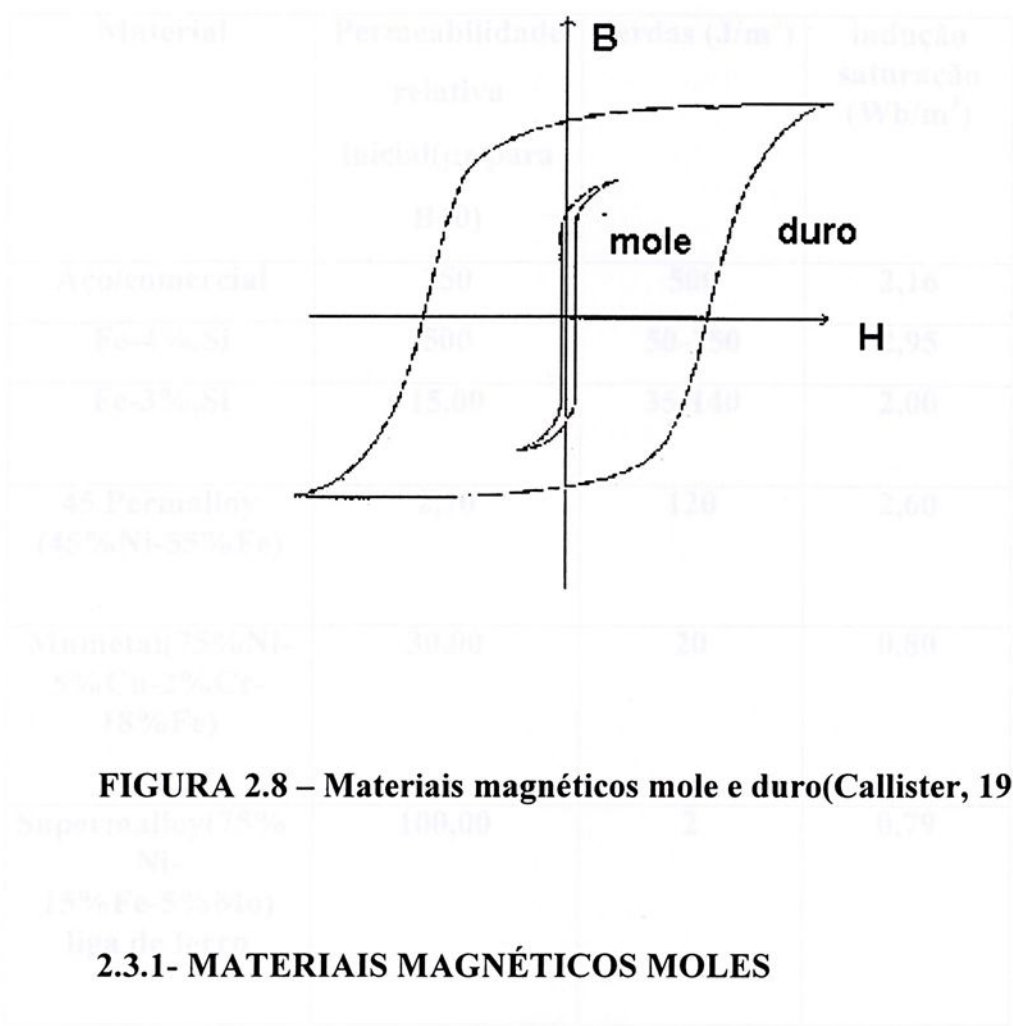


FIGURA 2.8 – Materiais magnéticos mole e duro(Callister, 1994)

2.3.1- MATERIAIS MAGNÉTICOS MOLES

Usualmente são aplicados em sistemas de potência para corrente alternada com frequência de 60Hz. Demonstra-se que quanto mais estreita a curva de histerese menores são as perdas, e na Tabela 2.2, observam-se os valores das propriedades magnéticas de materiais magnéticos moles.

TABELA 2.2 - Propriedades dos materiais magnéticos moles
(Callister,1994)

Material	Permeabilidade relativa inicial(μ_r para $B \sim 0$)	Perdas (J/m^3)	indução saturação (Wb/m^3)
Aço/comercial	250	500	2,16
Fe-4%,Si	500	50-150	2,95
Fe-3%,Si	15,00	35-140	2,00
45 Permalloy (45%Ni-55%Fe)	2,70	120	2,60
Mumetal(75%Ni- 5%Cu-2%Cr- 18%Fe)	30,00	20	0,80
Supermalloy(75% Ni- 15%Fe-5%Mo) liga de ferro	100,00	2	0,79

2.3.2- MATERIAIS MAGNÉTICOS DUROS

Os materiais magnéticos duros apresentam grande dificuldade de magnetização e grandes perdas magnéticas. Na Tabela 2.3, observa-se que a liga

Alnico devido ao valor do produto BH, sendo este igual à área envolvida pela curva, que está relacionada às perdas, é mais comercial.

TABELA 2.3 – Máximo produto BH para alguns metais magnéticos duro(Callister, 1994)

Ligas	BHmax(A/Wb/m²)
Cobalto	120,00
Platina-cobalto	70,00
Alnico	36,00

2.4 – MATERIAIS MAGNÉTICOS CERÂMICOS

Existem duas categorias de materiais magnéticos cerâmicos: de baixa condutividade e supercondutores.

2.4.1- CERÂMICAS MAGNÉTICAS DE BAIXA CONDUTIVIDADE

A princípio, todos materiais magnéticos cerâmicos comercialmente disponíveis são ferromagnéticos, que são ferritas, de estrutura spinélio. Algumas ferritas comerciais têm em sua composição magnésio (MgFe₂O₄), zinco–magnésio (MgZnFe₂O₄) e manganês (MnFe₂O₄). As características das composições com Zn, Mn, Mg e Fe_xO₄ determinam o desempenho em aplicações em microondas pelo fato de possuírem grande resistência elétrica (Callister, 1994).

2.5 – EFEITO PELICULAR(“SKIN”)

Em altas frequências, na faixa de GHz, as componentes do campo magnético atravessam um condutor, sendo que a frequência f em função do diâmetro do material (ferrita) é dada pela seguinte expressão:

sendo

$$f=(K/\Delta)^2 \quad (2.1)$$

K =constante em função das características do material

Δ=profundidade na qual o fluxo magnético é atenuado a 1/ξ

A equação do efeito pelicular(“skin”), de acordo com a Figura 2.9, é a seguinte:

$$\text{"skin" depth} = \left(\frac{6.61}{\sqrt{f}}\right) K \quad (2.2)$$

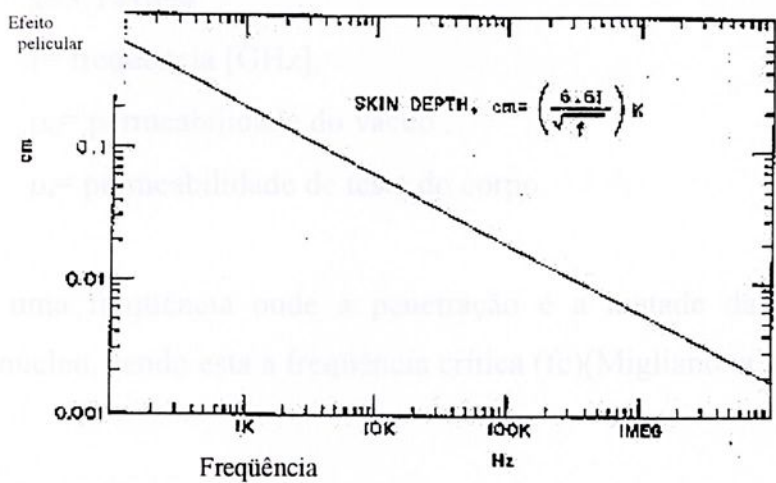


FIGURA 2.9 – Profundidade de penetração em relação a frequência(Migliano, 1990).

2.6 - CÁLCULO DO EFEITO PELICULAR (“SKIN”)

Para altas frequências, as correntes de Foucault podem ser intensificadas, chegando a limitar a profundidade das linhas de fluxo de campo magnético do material. Neste, caso, a profundidade de penetração é calculada por (Migliano, 1990; Migliano et al, 1999):

$$\xi = a/\delta \quad (2.3)$$

$$\delta = \sqrt{2\rho / \omega \mu_0 \mu_i} \quad (2.4)$$

Onde valores de ξ e δ definem a profundidade na qual o fluxo que atravessa uma espessura a [m] e resistividade ρ [Ωm] (apêndice 1), onde

$$\omega = 2\pi f \quad (2.5)$$

$$\pi = 3.141694\dots$$

f = frequência [GHz],

μ_0 = permeabilidade do vácuo ,

μ_i = permeabilidade de teste do corpo. (2.7)

Existe uma frequência onde a penetração é a metade da espessura de laminação do núcleo, sendo esta a frequência crítica (f_c)(Migliano et al, 1999) .

$$f_c = \frac{4\rho}{\pi \mu_0 \mu_i a^2} \quad (2.6)$$

No projeto deste trabalho aplica-se uma frequência $f=10$ GHz a um corpo-de-prova de dimensão $a=1$ mm conforme ilustrado na Figura 2.10.

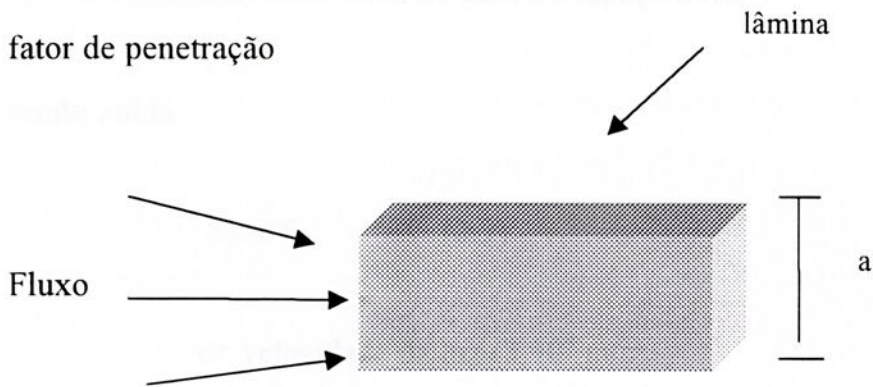


Figura 2.10 – Fluxo através de uma lâmina de espessura a

A expressão perturbacional (Altschuler, 1963) 2.7 para determinar μ_i (permeabilidade) para uma amostra cúbica, utilizando as equações (2.3) e (2.4), é dada por:

$$\Delta f/f = \omega(\mu_i - 1) \cdot k \cdot \pi/6 \cdot V_s/V, \quad (2.7)$$

sendo

Δf = variação de frequência,

V_s = volume da amostra,

V = volume da cavidade e,

$$k = 2(1 - \lambda_0/2a)^2 \quad (2.8)$$

sendo

a = maior dimensão da cavidade ressonante,

λ_0 = o comprimento de onda do guia no espaço livre,

sendo ainda

$$\lambda_0 = c/f_0, \quad (2.9)$$

c = velocidade da luz ($3 \cdot 10^8$ m/s)

f_0 = frequência da cavidade ressonante.

2.7 - ESTUDOS DE MATERIAIS MAGNÉTICOS PARA REGIÃO DE BANDA- X DE MICROONDAS

2.7.1 - GUIAS DE ONDAS ELETROMAGNÉTICAS

São considerados dois métodos de transmissão de energia, conforme citados a seguir:

- usam-se fios condutores, quando opera-se em baixas frequências (no máximo de dezenas de MHz),
- para frequências de 1 a 300 GHz, usam-se guias de ondas nas formas cilíndricas ou retangulares, as últimas, como ilustrado na Figura 2.12 (Ediminister, 1982).

2.7.2- CAVIDADES RETANGULARES

Para a determinação das propriedades eletromagnéticas as amostras em torno de 10 GHz , projetou-se uma cavidade ressonante para ensaio de ferritas nessa mesma frequência. O material utilizado para a fabricação desta cavidade foi o latão, submetido a processo de usinagem e polimento.

No estudo de cavidades retangulares, com comprimento d , sendo este o maior lado, tem-se a seguinte relação (Edminister, 1982; Freitas, 1996; Migliano et al, 1999):

$$d < \lambda < 2d \quad (2.10)$$

sendo

λ : comprimento de onda



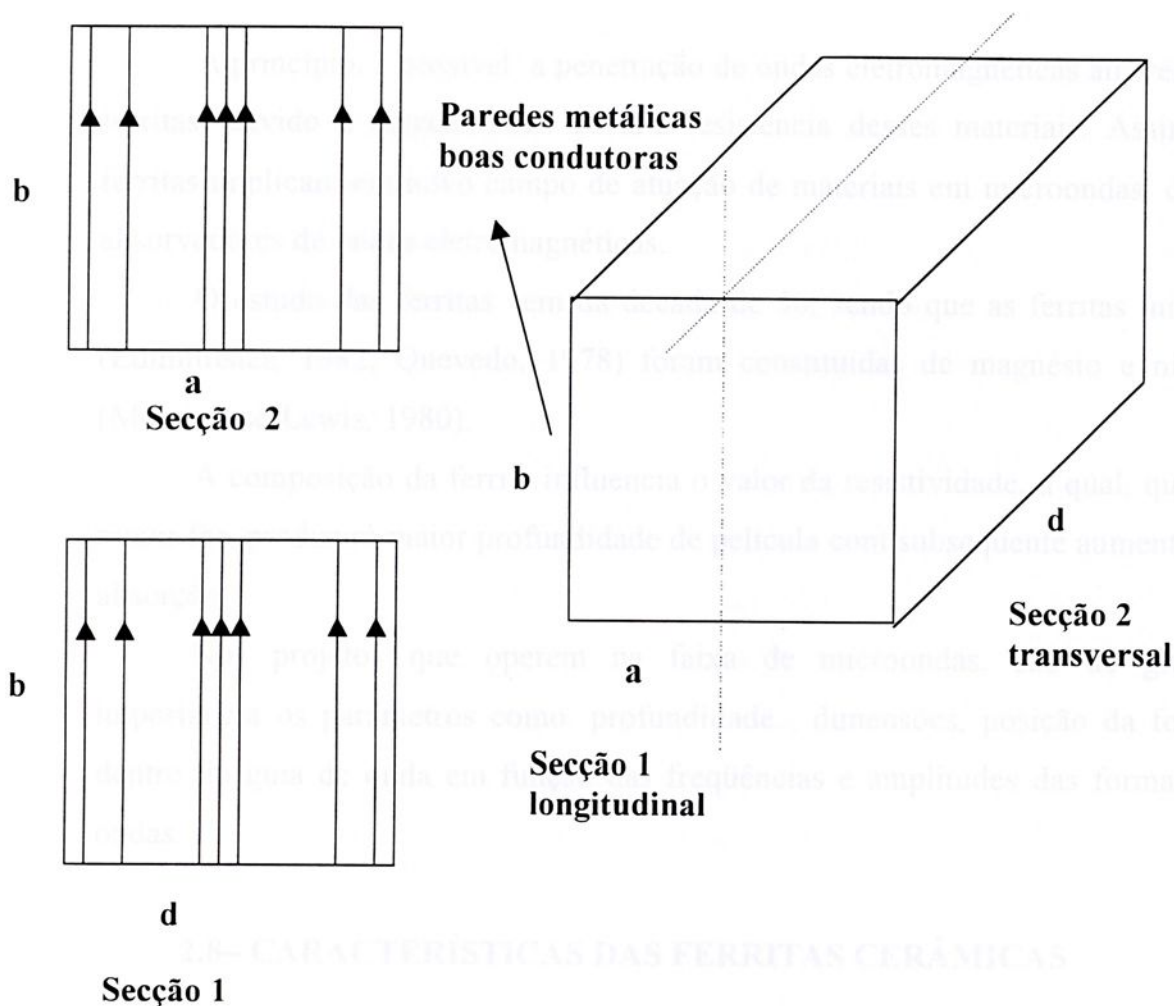


FIGURA 2.11 - Secção do guia de onda do modo de transmissão TE_{101} (Freitas, 1996).

Usou-se um guia retangular para as experiências em projetos de laboratórios e nota-se que as características de propagação do guia podem ser modificadas pela colocação no seu interior de vários materiais. Cita-se, por exemplo, que tanto os dielétricos como os policristalinos causam atenuação na onda de transmissão (Ediminister, 1982). Os materiais magnéticos podem ser introduzidos no guia de onda para estudo do efeito pelicular.

A princípio, é possível a penetração de ondas eletromagnéticas através das ferritas, devido à característica de alta resistência desses materiais. Assim as ferritas implicam em novo campo de atuação de materiais em microondas, como absorvedores de ondas eletromagnéticas.

O estudo das ferritas vem da década de 50, sendo que as ferritas iniciais (Ediminister, 1982; Quevedo, 1978) foram constituídas de magnésio e níquel (Morrisson&Lewis, 1980).

A composição da ferrita influencia o valor da resistividade, a qual, quanto maior for, produzirá maior profundidade de película com subsequente aumento de absorção.

Nos projetos que operem na faixa de microondas, são de grande importância os parâmetros como: profundidade, dimensões, posição da ferrita dentro do guia de onda em função das frequências e amplitudes das formas de ondas.

2.8- CARACTERÍSTICAS DAS FERRITAS CERÂMICAS

Os materiais magnéticos apresentam como principal característica o “efeito histerese”, que é uma relação não linear entre o campo magnético H e o campo de indução eletromagnética B do material. Na Figura 2.3 estão definidos e ilustrados, os parâmetros como: permeabilidade magnética, magnetização de saturação e magnetização remanente.

As ferritas apresentam características de elementos dos tipos: metálicos, ligas metálicas, ligas de terras raras e cerâmicas. As ferritas cerâmicas destacam-se na classe de materiais ferromagnéticos pela facilidade de fabricação, custo e pelo fato de absorverem ondas eletromagnéticas (Migliano, 1999; Msfour et al, 1986), pois, neste caso, tem-se baixas perdas devido ao forte acoplamento magnético e alta resistividade. Esta classe teve comercialização nas décadas de 40 (Wallace,

1993), quando a tecnologia de materiais ferromagnéticos teve aplicações especiais e, atualmente, também podem ser utilizadas em aplicações aeroespaciais (Marques&Varanda, 1988).

A princípio, uma das principais características do uso de materiais cerâmicos na classe de materiais magnéticos é na fabricação de ferritas que tem baixo custo e alta resistência elétrica (Migliano et al, 1999; Johnson, sn. sl.). Cita-se outras propriedades das cerâmicas magnéticas:

- Estrutura $M_2 Fe_3 O_3$ (Veney&Holman, 1947),
- Condutividade elétrica alta (Sattar, 1996),
- São todas óxidas (Johnson, sn. sl.),
- Presença de elemento Fe_2O_3 em suas composições (Johnson, sn. sl.),
- Possuem uma indução magnética quando submetida à uma ação de campo magnético externo (Johnson, sn. sl.).

2.9 - FASES CERÂMICAS E SUAS PROPRIEDADES

Os materiais cerâmicos abrangem grande quantidade e variedade de substâncias naturais e sintéticos como: vidros, tijolos, porcelana, materiais dielétricos e magnéticos (Van Vlack, 1973; King, 1990). As cerâmicas magnéticas de composição MgO são de grande aplicação na fabricação de ferritas, pois exibem características magnéticas, refratárias e também trabalham em grandes temperaturas.

2.9.1 - ESTRUTURA CRISTALINA DAS FASES CERÂMICAS

A estrutura cristalina das cerâmicas pode acomodar vários tipos de átomos, por exemplo, a estrutura de MgO (Van Vlack, 1973), que constitui uma estrutura

compacta, como ilustrado na Figura 2.12. Neste caso, são satisfeitas as exigências relativas ao tamanho dos íons e ao número de elétrons, tornando assim uma estrutura compacta. Outros materiais cerâmicos podem incluir muitos tipos de átomos em sua estrutura sendo requisito fundamental para obtenção da estrutura compacta o balanceamento das cargas elétricas.

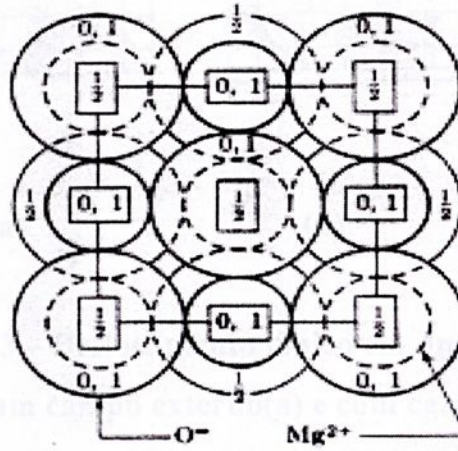


FIGURA 2.12 - Estrutura cerâmica cristalina tridimensional do MgO, onde os números assinalam a localização em profundidade dos átomos na célula unitária (0=face superior, $\frac{1}{2}$ = posição meio, 1=face anterior) (Van Vlack, 1973)

2.9.2 - MATERIAIS CERÂMICOS FERRIÉLETRICOS

Quando o átomo está sob a ação de um campo elétrico, sendo externo ou não ocorrem os deslocamentos iônicos: Portanto as cargas interligam-se conforme a ação do campo, como ilustrado na Figura 2.13, que mostra uma situação de deslocamento iônico, sob a ação de campos elétricos ou magnéticos. Após a retirada da ação do campo elétrico, ocorre um novo posicionamento elétrico, isto

é, os íons voltam a vibrar em torno de suas posições originais (Van Vlack, 1973; Kingery, 1990).

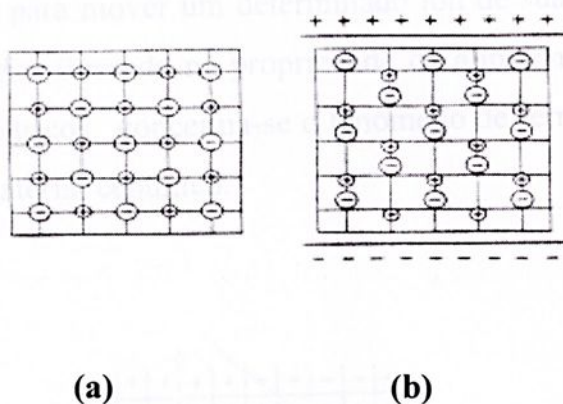


FIGURA 2.13 – Deslocamento iônico em um campo elétrico no caso de um campo externo(a) e com campo interno (b) (Van Vlack, 1973).

Os materiais cerâmicos ferrelétricos podem ser representados por meio de uma estrutura cúbica-tetragonal, conforme ilustrado na Figura 2.14, onde se tem uma representação da composição BaTiO_3 em uma temperatura abaixo de 120°C , sendo que esta estrutura passa de forma cúbica para uma forma tetragonal.

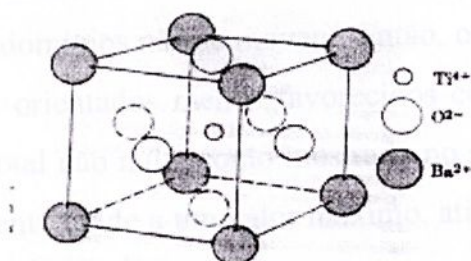


FIGURA 2.14 – Exemplo de estrutura BaTiO_3 cúbico . Sendo que esta estrutura é estável acima de 120°C , pois possui um íon Ti no centro cubo (Kingery, 1960).

A polaridade de um grupo de células unitárias que pode ser mantida por certo período de tempo no domínio, está ilustrado na Figura 2.15. Nota-se que necessita-se de energia para mover um determinado íon de sua posição de baixa para a de alta de energia. Baseado na propriedade de alinhamento orientado do domínio dos dipólos elétricos, conceitua-se o fenômeno de ferrieletricidade (Van Vlack, 1973) em um material cerâmico.

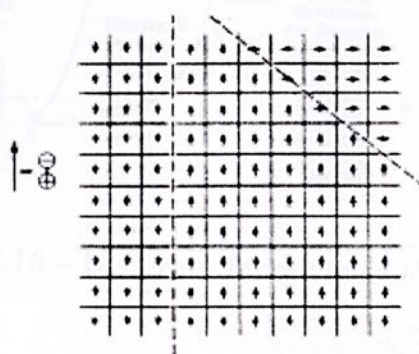


FIGURA 2.15 – Domínios ferrieletricos (Van Vlack, 1973)

Quando um material ferrieletrico, contendo muitos domínios de alinhamentos orientados ao acaso, está sob a ação de um campo elétrico externo, as fronteiras entre domínios não se movem. Então, os orientados mais favorecidos expandem-se e os orientados menos favorecidos contraem-se, originando assim uma polarização total não nula, como mostrado no segmento AO na Figura 2.16. Porém o alinhamento tende a um valor máximo, atingindo então uma situação na qual um aumento adicional no campo elétrico apenas melhora ligeiramente o valor de polarização, como mostrado no segmento AB da Figura 2.16. A remoção do campo elétrico externo não elimina totalmente a polarização remanente P_r , que é mantida até que seja aplicado um campo E_c de polaridade oposta. A aplicação

de campos adicionais produz um ciclo de histerese, como o percurso BCDFB ilustrado na curva da Figura 2.16.

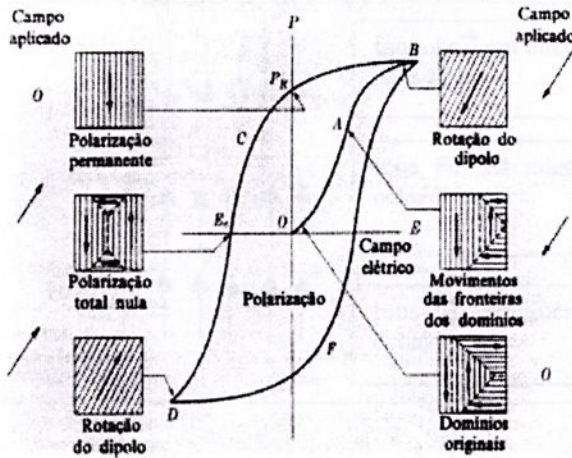


FIGURA 2.16 – Histerese ferrelétrica (Van Vlack, 1973)

2.10– MATERIAIS CERÂMICOS MAGNÉTICOS

Compostos cerâmicos que contêm ferro, níquel ou cobalto só podem ser caracterizados como magnéticos, desde de que suas estruturas sejam tais que permitam que os íons tenham seus momentos magnéticos alinhados espontaneamente. Os arranjos AB_2X_4 possuem uma composição cúbica de face centrada e arranjam-se de modo que A é cátion bivalente e B trivalente, fazendo então com que a carga total seja nula (Van Vlack, 1973).

A Figura 2.17 ilustra o fenômeno do ferromagnetismo no $NiFe_2O_4$, porém mais detalhes serão analisados nos próximos capítulos.

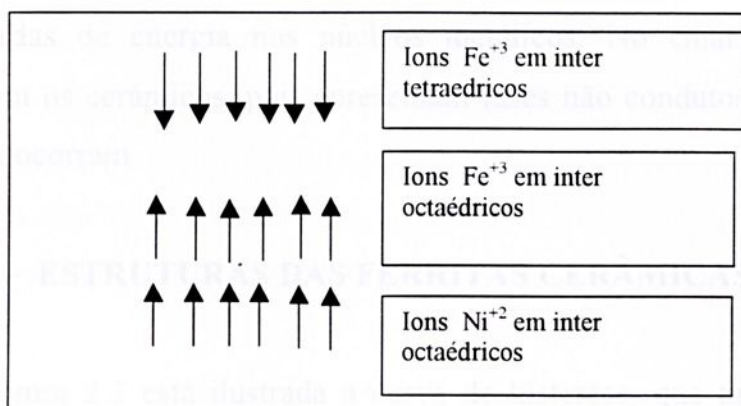


FIGURA 2.17 – Ferromagnetismo no NiFe_2O_4 , onde os íons magnéticos estão orientados em duas direções

2.11 - COMPORTAMENTO ELETROMAGNÉTICO DOS MATERIAIS CERÂMICOS

Os materiais cerâmicos são conhecidos pelo uso como isolantes elétricos, devido as suas principais características de:

- altas constantes dielétricas ,
- reações piezelétricas,
- comportamento dielétrico.

Cerâmicas dielétricas (Van Vlack, 1973; A. I. M.E., 1949) - Muitos óxidos apresentam propriedades isolantes porque a valência eletrônica dos átomos metálicos é transferida permanentemente para os átomos de oxigênio, assim formando íons O^{2-} .

Cerâmicas magnéticas(Van Vlack, 1973; A. .I. M.E., 1949) - Os ímãs metálicos apresentam uma grande desvantagem nos circuitos UHF e VHF, isto é, na alta frequência é produzida uma indução de correntes, fazendo com que existam perdas de energia nos núcleos metálicos. No entanto, tal fato não acontece com os cerâmicos, pois apresentam fases não condutoras, evitando que estas perdas ocorram.

2.12 – ESTRUTURAS DAS FERRITAS CERÂMICAS

Na Figura 2.3 está ilustrada a curva de histerese, que mede a relação de campo magnético **H** em função da indução magnética **B**, sendo que, é uma relação matemática para medição do parâmetro μ , definido por:

$$B = \mu_r \mu_0 H \quad (2.11)$$

Sendo a permeabilidade (μ), uma função não linear, quando se incrementa discretamente o domínio magnético do campo **H** na ferrita, tem-se maior saturação **Bs**.

O campo magnético, junto ao poder de magnetização dos materiais, faz com que as propriedades de caracterização das ferritas por meio do parâmetro μ_r , classifiquem-se em três tipos :

- spinélio,
- hexagonal e
- granada.

2.12.1 - FERRITA DE ESTRUTURA SPINÉLIO

A principal característica de uma ferrita spinélio, é que a composição de sua fórmula tem a estrutura de AB_2O_4 , que é uma estrutura descrita por Bragg (Van Vlack, 1973; Smit et al, 1990, Nisrikiawa, 1950), como ilustrado no cubo da Figura 2.18 (Brose, 1968, Katsura&Wakiara, 1975; Ohta, 1980).

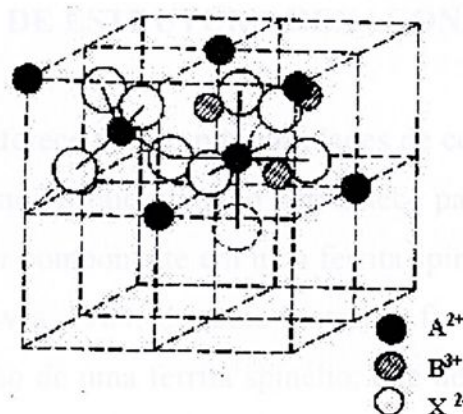


FIGURA 2.18 – Unidade celular de uma ferrita de estrutura spinélio, com uma alternativa tetrahedral (AO_4) e octohedral (BO_6)
(Nishikawa, 1950; Smit et al, 1990)

Os óxidos são reestruturado dentro de um pacote fechado de estrutura cúbica, com estrutura octaédrica e tetraédrica, na Figura 2.18. Notam-se unidades de composição AB_2O_4 , onde ânions relativos ao oxigênio são arranjados no pacote cúbico no modelamento octahedral e tetrahedral (Takada, sn. sl.). Em uma primeira aproximação os ânions são considerados rígidos e a presença dos cátions

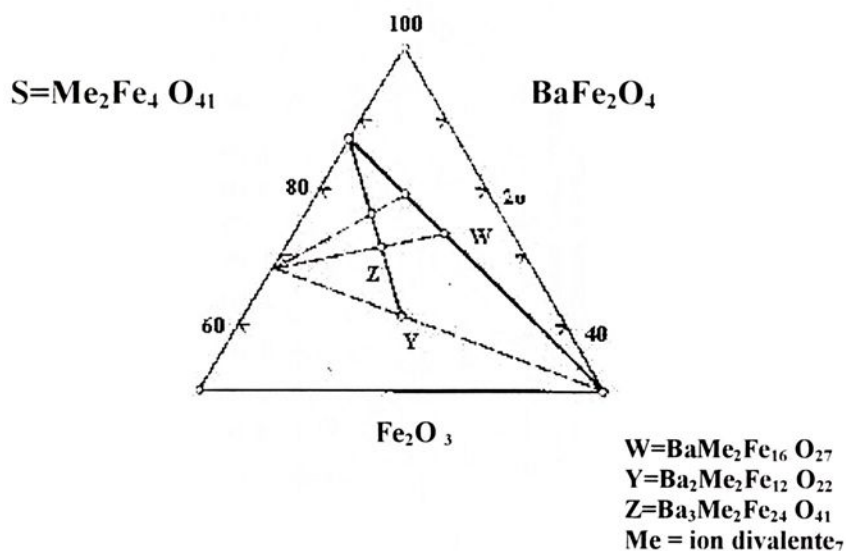
dos lados intersticiais causa distorção no substrato do oxigênio, sendo então os lados da coordenada tetrahedral fracamente expandida (Enoumos, 1955).

As ferritas da categoria spinélio têm estrutura do tipo: $\text{Fe}_2\text{O}_3 : 1\text{MeO}$, onde MeO = metal de transição (Migliano et al, 1999; Enoumos, 1955), por exemplo, quando $\text{Me}=\text{Zn}, \text{Cd}, \text{Ni}, \text{Co}, \text{Mn}, \text{Cu}$, (Enoumos, 1955). As ferritas espinélios são muito utilizadas nas indústrias de telefonia, transformadores, filtros para microondas (Sattar, 1996), etc.

2.12.2 – FERRITA DE ESTRUTURA HEXAGONAL

A estrutura AB_2O_4 oferece muitas possibilidades de combinações de cátions regulares em um sistema onde o raio atômico permanece passivamente constante. O elemento Fe_2O_3 é o maior componente em uma ferrita spinélio (Enoumos, 1955; American Society Microwaves, 1980; Ceramic Materials for Eletronics, 1991). No modelamento da composição de uma ferrita spinélio, que define a localização dos cátions dentro de um sistema octahedral e tetrahedral, adota-se a seguinte formulação $\text{Me}^{++} [\text{Fe}_2^{+++}] \text{O}_4$, sendo então uma característica spinélio formal. As definições das composições tecnológicas de uma ferrita hexagonal, possuem a estrutura do tipo: $6\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 1\text{MeO}$, onde MeO = óxido de metal bivalente, grupo II A da tabela periódica, por conseguinte a base de $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ (American Society Microwaves, 1980) é uma isoestrutural com naturalidade de ocorrência do magneto de ferro $\text{PbFe}_{7,5} \cdot \text{Mn}_{7,5} \text{Al}_{0,5} \text{Ti}_{0,5} \text{O}_{19}$ (Bertard&Forrat, 1956), sendo que esta estrutura está representada na Figura 2.19.

Ilustra-se na Figura 2.20 a estrutura de uma ferrita hexagonal de base $\text{BaO-M}_2\text{-O-Fe}_2\text{O}_3$, com uma magnetização de saturação em torno de ≈ 4000 gauss (Smit et al, 1950; Stujits et al, 1954; Ceramic materials for eletronic, 1991).



**FIGURA 2.19 – Composição hexagonal da ferrita a base
Ba-O-MeO-Fe₂O₃ (American Society Microwaves, 1980).**

2.12.3 - FERRITAS DE ESTRUTURA GRANADA

A composição básica de uma ferrita granada é a base $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{15}$ (YIG), sendo uma característica de isoladores ferromagnéticos de terra rara. O material é cúbico, como a spinélio, e tem sua estrutura similar à granada mineral $\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$, como ilustrado na Figura 2.21 (Geller, 1957).

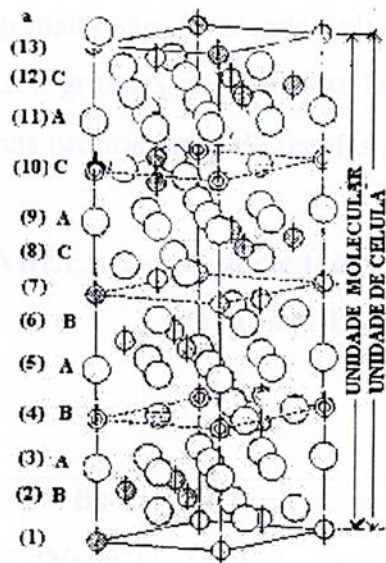


FIGURA 2.20 – Unidade de estrutura de célula de ferrita
 $M^{++}Fe_{12}O_{19}$, hexagonal (Gilleo, 1980).

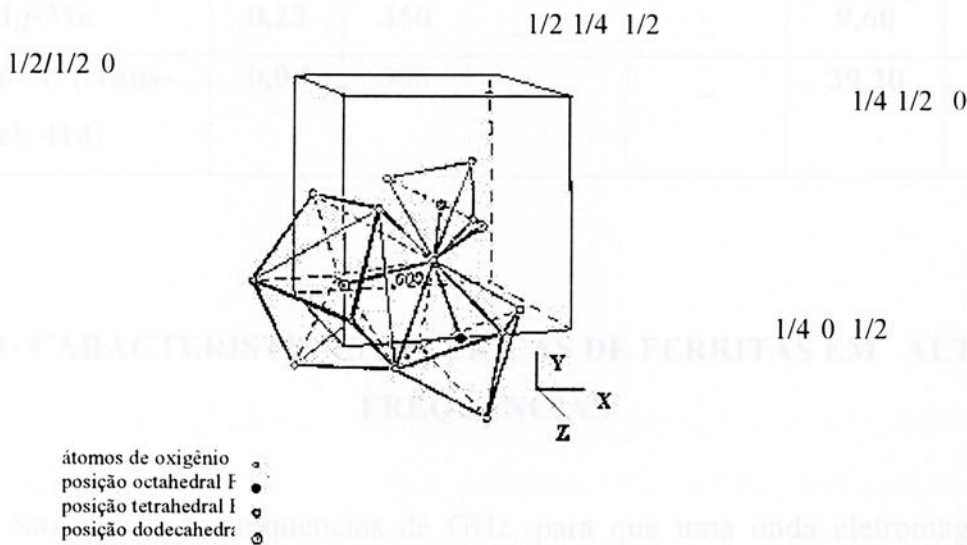


Figura 2.21– Estrutura da unidade de célula da ferrita
granada $Y_3Fe_5O_{15}$ (YIG)(Geller, 1957)

As ferritas granada são de grande aplicação em uso em altas frequências, pois podem operar sob grandes potências na faixa de microondas. A Tabela 2.4 a seguir ilustra algumas propriedades de ferritas granada.

TABELA 2.4- Propriedades de certas ferritas de estrutura granada (Clarriots, 1961)

Material	Bs (Vs/m ²)	Tc (°C)	ε (εo)	Tan δ _ε	ΔH (kA/m)	Geef F MHz
NiFe ₂ O	0,35	565	12,70	0,0037	73,60	2,40
Mg-Mn-ferrite	0,23	300	13,60	0,001	39,20	2,06
Mg-Mn	0,23	350	—	—	9,60	—
Mg-Mn-Al (trans- tech 414)	0,06	300	—	—	39,20	—

2.13- CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DE FERRITAS EM ALTAS FREQUÊNCIAS

Nas faixas de frequências de GHz, para que uma onda eletromagnética penetre no corpo da ferrita , pelo efeito pelicular (“skin”), é necessário que a mesma tenha uma alta resistência elétrica, da ordem de 10⁶Ωcm (Callister, 1994). Neste caso, as ferritas têm baixas perdas tanto dielétricas como magnéticas. Considerando propriedades elétricas de ferritas em altas frequências, o valor da



constante dielétrica é de aproximadamente de $(10-15)\epsilon_0$. A Tabela 2.5 ilustra a variação da constante dielétrica ϵ das ferritas em função da frequência

TABELA 2.5-Propriedades elétricas das ferritas
(Van Vitier, 1956)

Ferrita	$\rho_1(\Omega\text{cm})$	$\rho_2(\Omega\text{cm})$	F (MHz)
Mn-Zn	130	10	100
Ferrocerâmica B	$2 \cdot 10^5$	100	100
Cu-Zn	$2 \cdot 10^5$	4000	10
Ferrocerâmica I	$5 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^5$	10
Ni-Zn	$2 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^5$	0.1
NM1350	$8 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^5$	10
N 1250	$6 \cdot 10^6$	$4 \cdot 10^5$	10
NM 1250	$2 \cdot 10^9$	$2 \cdot 10^7$	10
Crowloy BX	$6 \cdot 10^8$	$3 \cdot 10^6$	10
Ferramic A	$2 \cdot 10^9$	$2 \cdot 10^7$	10

Para conseguir uma alta resistência elétrica específica, é necessário que se tenha a presença de íons de diferentes valências, no caso particular íons de Fe^{+2} e Fe^{+3} como também Al^{+3} . A Tabela 2.6 mostra uma composição $\text{NiAl}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$ onde $0 < x < 1$, e tem-se uma resistência de $4 \cdot 10^{10} \Omega$.

TABELA 2.6-Propriedades de ferritas em microondas(Pringle&Help Burn, 1960)

Ferrita	Js	ΔH	Tc	ρ
	(Vs/m ²)	(kA/m)	(°C)	(Ωcm)
NiFe ₂ O ₄	0,33	44,80	580	4.10 ³
NiAl ₀₁₂ Fe _{2.88} O ₄	0,27	33,60	540	4.10 ⁴
NiAl _{035.65} O ₄	0,12	67,20	430	4.10 ³
NiAlO ₄	0,05	32,60	186	2.10 ⁹
Mg ₀₉ Mg _{0.2.65} Fe _{2.6} O _{3.4}	0,25	56,00	290	8.10 ⁸

MÉTODOS, PROCESSOS DE FABRICAÇÃO E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 – INTRODUÇÃO

Optou-se pela elaboração de uma ferrita cerâmica com características de aplicação de uso no setor aeroespacial, estudou-se composições de ferritas que operem em faixa de frequência de banda-X. Neste capítulo descreve-se o processo de fabricação inicial da ferrita de composição $\text{MnO-MgO-Fe}_2\text{O}_3$, que será utilizada como um componente para fabricação de uma manta absorvedora de ondas eletromagnéticas, sendo o objetivo principal da pesquisa sobre materiais absorvedores.

Foi elaborado um corpo-de-prova em formato cúbico com dimensões de $1 \times 1 \times 1 \text{ mm}^3$, sendo que a frequência de trabalho principal foi estipulada em 10 GHz. Os trabalhos experimentais de fabricação e medidas foram feitos nos seguintes laboratórios: Cerâmicas da Divisão de Materiais (AMR) do Instituto de Aeronáutica e Espaço e Laboratório de Microondas do Instituto de Tecnológico de Aeronáutica (ITA).



3.2-COMPOSIÇÃO MnO-MgO- Fe₂O₃

Após todas pesquisas bibliográficas, optou-se para uma formulação de ferrita, sendo que, o material escolhido tem composição: MnO-MgO-Fe₂O₃, que é bem aceita em aplicações de microondas, pois uma das razões é a alta resistência elétrica do elemento magnésio (10⁸-10¹⁰Ω). Por causa desta alta resistência, ondas eletromagnéticas podem penetrar no corpo do material em altas frequências. Uma região de aplicação de microondas é encontrada em um sistema cuja composição tenha MnO-MgO-Fe₂O₃, de acordo com o diagrama de fases da Figura 3.1

De acordo com o diagrama da Figura 3.1, escolheu-se a seguinte composição 6MgO1MnO3Fe₂O₃, pois é um ponto que está na faixa de composição apropriadas para microondas, para uma amostra de 100g de 6MgO1MnO3Fe₂O₃, composição para elaboração de um corpo-de-prova, e na Tabela 3.1, tem-se:

(Albers&Schoenberg, 1954)

TABELA 3.1-Composição percentual do pó de ferrita

MgO(%)	MnO(%)	Fe ₂ O ₃ (%)
30,55	8,96	60,49

3.1-PROCESSO DE FABRICAÇÃO

As matérias primas foram pesadas em balança eletrônica com a precisão de 0,01 g com valores determinados na formula de composição da Tabela 3.1, e em um moinho de energia Spex II foi feita a mistura e homogeneização em um tempo de 10 minutos. A seguir, fez-se uma

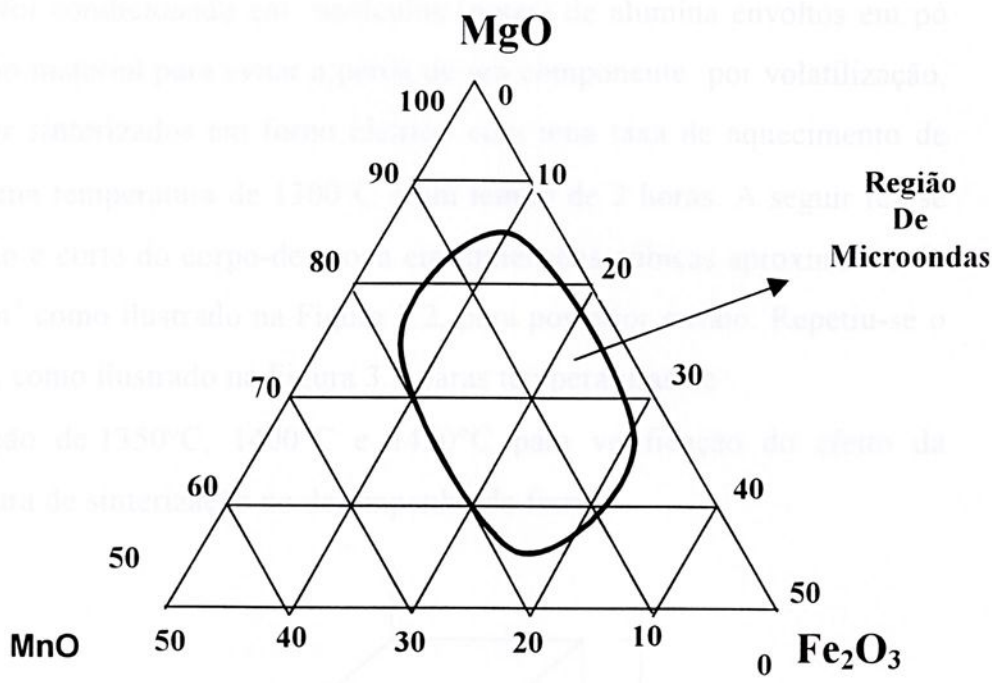


FIGURA 3.1- Diagrama de fases MnO-MgO-Fe₂O₃
(Albers&Schoemberg, 1954)

TABELA 3.1-Composição percentual do pó de ferrita

MgO(%)	MnO(%)	Fe ₂ O ₃ (%)
30,55	8,96	60,94

3.3 –PROCESSO DE FABRICAÇÃO

As matérias primas foram pesadas em balança eletrônica com a precisão de 0,01 g com valores determinados na fórmula de acordo com a Tabela 3.1, e em um moinho de energia Spex II foi feita a mistura e homogeneização em um tempo de 10 minutos. A seguir, fez-se uma

prensagem uniaxial em um molde de aço a uma pressão de 40 MPa. O material foi condicionado em navículos (potes) de alumina envoltos em pó do próprio material para evitar a perda de um componente por volatilização, e a seguir sinterizados em forno elétrico com uma taxa de aquecimento de 10°C a uma temperatura de 1300°C e um tempo de 2 horas. A seguir fez-se retificação e corte do corpo-de-prova em dimensões cúbicas aproximadas de $1 \times 1 \times 1 \text{ mm}^3$ como ilustrado na Figura 3.2, para posterior ensaio. Repetiu-se o processo, como ilustrado na Figura 3.3 para temperaturas de sinterização de: 1350°C , 1400°C e 1450°C para verificação do efeito da temperatura de sinterização no desempenho da ferrita.

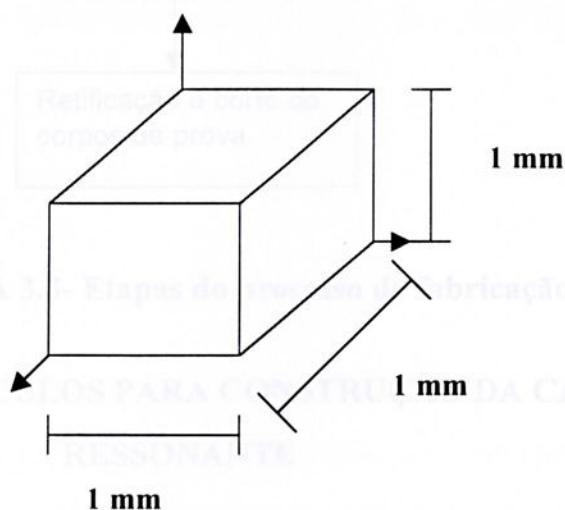


FIGURA 3.2 – Geometria final da amostra

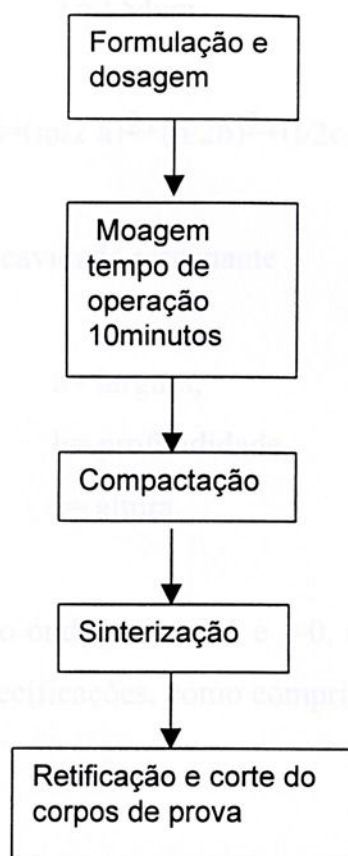


FIGURA 3.3- Etapas do processo de fabricação

3.4 - CÁLCULOS PARA CONSTRUÇÃO DA CAVIDADE RESSONANTE

A cavidade ressonante deve ser constituída a partir de um guia de ondas retangular com acoplamento por diafragma para ser colocado na extremidade da instrumentação onde deve-se realizar as medições. E a ferrita devera ser colocada no interior desta cavidade.

Equacionamento:

Para uma freqüência de 10GHz (modo TE_{101})

$\lambda = c/f$, comprimento de onda de ressonância (c = velocidade da luz)

$$\lambda=2,54\text{cm}$$

$$(1/\lambda^2)=(m/2a)^2+(n/2b)^2+(l/2c)^2 \quad (3.2)$$

a ,b , c - dimensões da cavidade ressonante

a= largura,

b= profundidade,

c= altura.

para um campo máximo onde $m=1$, $n=1$ e $l=0$, ajustando-se os comprimentos tem-se as seguintes especificações, como comprimentos padrões:

$$a=4,15\text{cm}$$

$$b=3,44\text{cm}$$

$$c=1,52\text{cm}$$

O material escolhido foi o latão, sendo feito um acabamento em torno e polimento especial para eliminação das rugosidades, para que não tenha influências nas medidas serem realizadas. A Figura 3.4 ilustra a cavidade ressonante em sua forma final.



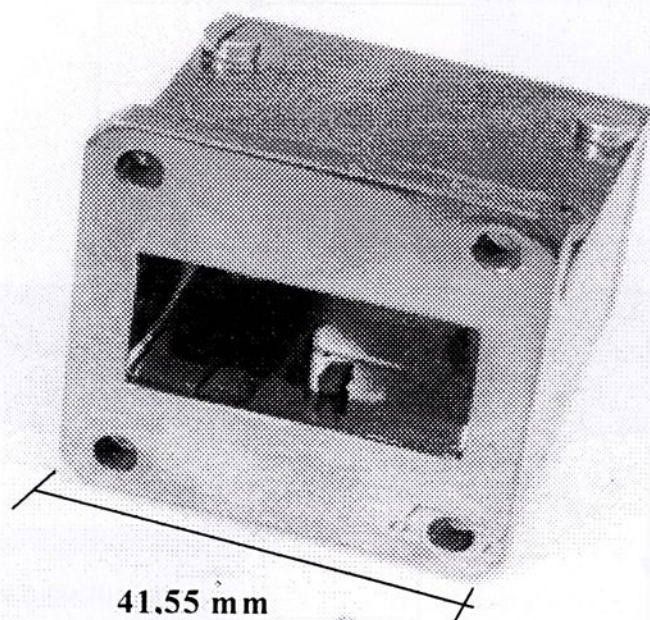


FIGURA 3.4 – Cavidade ressonante (Guia de ondas retangular curto circuitado em uma extremidade e com acoplamento por diafragma no outra extremidade), fabricado no laboratório de mecânica do IEAv.

3.5 - RESULTADOS

Em laboratório fizeram-se as medidas, usando o esquema de instrumentação mostrado a seguir (Figura 3.5 e Figura 3.6):

FIGURA 3.5 - Esquema de instrumentação utilizado na medida de frequência de ressonância.

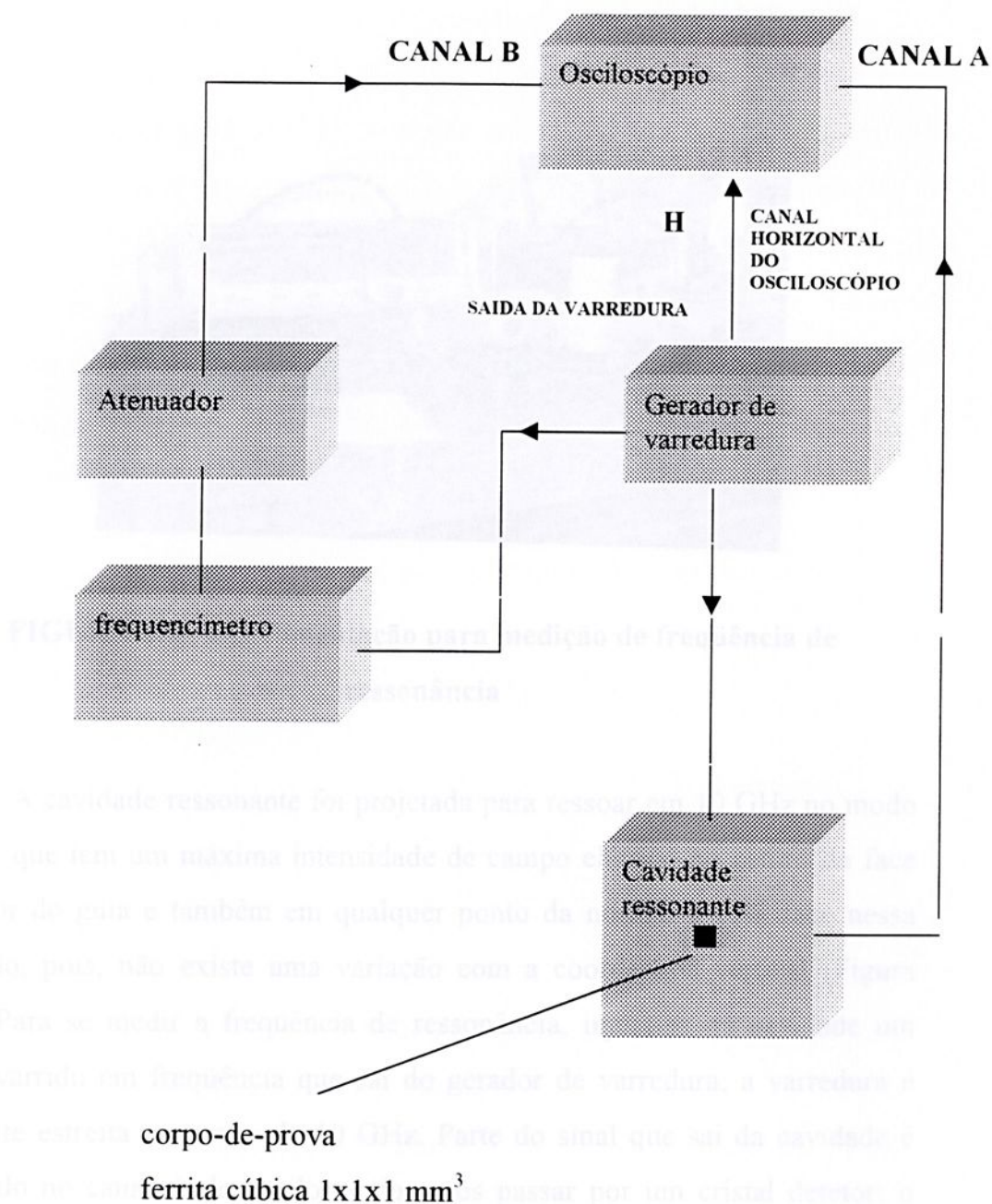


FIGURA 3.5 - Esquema de instrumentação utilizado na medidas de frequência de ressonância

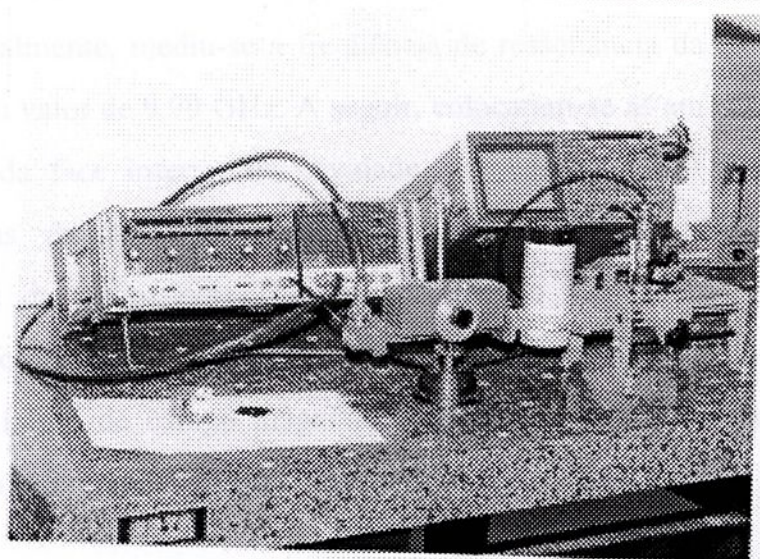


FIGURA 3.6— Instrumentação para medição de frequência de ressonância

A cavidade ressonante foi projetada para ressoar em 10 GHz no modo TE_{101} que tem um máxima intensidade de campo elétrico no centro da face inferior do guia e também em qualquer ponto da normal a essa face nessa posição, pois, não existe uma variação com a coordenada vertical (Figura 3.6). Para se medir a frequência de ressonância, injeta-se na cavidade um sinal varrido em frequência que sai do gerador de varredura; a varredura é bastante estreita em torno de 10 GHz. Parte do sinal que sai da cavidade é aplicado no canal A do osciloscópio, após passar por um cristal detetor; o sinal do gerador de varredura também é injetado no canal A do osciloscópio, após passar por um cristal detetor; o sinal do gerador de varredura também é aplicado no frequencímetro e, após a passagem pelo cristal detetor, é aplicado no canal B do osciloscópio; o sinal de varredura (onda dente de serra) é injetado no canal horizontal, H, do osciloscópio (Figura 3.5). A frequência de ressonância é achada sintonizando-se o frequencímetro até que sua ressonância (canal B) coincida com a ressonância da cavidade

ressonância (canal B) coincida com a ressonância da cavidade (canal A); o valor da ressonância é lido no frequencímetro de precisão de 1MHz.

Inicialmente, mediu-se a frequência de ressonância da cavidade vazia, achando um valor de 9,99 GHz. A seguir, colocaram-se as amostras de ferritas no centro da face inferior da cavidade, e mediram-se as frequências de ressonâncias da cavidade perturbadas pelas amostras. Os valores das frequências de ressonâncias estão apresentada na Tabela 3.2. Como as amostras foram colocadas numa posição de máximo de campo elétrico, portanto mínimo de campo magnético (idealmente nulo), as frequências de ressonância referem-se a propriedades dielétricas da ferrita.

TABELA 3.2 – Medidas obtidas de frequências

Temperatura [°C]	1300	1350	1400	1450
Frequência (GHz)	9,94	9,97	9,92	9,88

**3.6 - CARACTERIZAÇÃO PELO EFEITO PELICULAR ("SKIN")
FERRITAS CERÂMICAS A BASE DE MnO-MgO-Fe₂O₃ PARA
OPERAÇÃO EM FREQUÊNCIAS NA BANDA-X(Migliano, 1990;
Shoohoo, 1960; Lax, 1962)**

Pelas equações (2.3), (2.4), (2.5), (2.6), (2.7), (2.8) e (2.9), apresentadas no apêndice 1, calcula-se a expressão perturbacional para determinar μ (permeabilidade), sendo dada por:



$$\Delta f/f = \omega(\mu-1).k.\pi/6.V_s/V, \quad (3.3)$$

onde

Δf = variação de frequência,

V_s = volume da amostra,

V = volume da cavidade

e

$$k = 2(1 - \lambda_0/2a)^2 \quad (3.4)$$

a = maior dimensão da cavidade ressonante,

λ_0 = é o comprimento de onda do guia no espaço livre,

então

$$\lambda_0 = c/f, \quad (3.5)$$

$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ - velocidade da luz

f_0 = frequência da cavidade ressonante 10^{10} GHz.

logo

$\lambda_0 = 3 \text{ cm}$,

como $a = 3 \text{ cm}$ (cavidade ressonante),

tem-se,

TABELA 3.3 Resultados obtidos pelo cálculo das equações de efeito pelicular

Com um multímetro de precisão medem-se as resistências dos corpos-de-prova, e por meio da expressão (3.3), calcula-se a resistividade dos mesmos.

$\rho = RL/A,$				
(3.6)				
sendo				
$R =$ resistência do corpo-de-prova,				

L = comprimento do corpo-de-prova,

A= área transversal do corpo-de-prova:

Com os valores obtidos, tem-se os resultados na Tabela 3.3.

TABELA 3.3- Resultados obtidos pelo cálculo das equações do efeito pelicular

Temperatura de Sinterização (°C)	1300	1350	1400	1450
f (GHz)	9,94	9,97	9,92	9,88
μ	288,95	110,95	404,14	613,56
Resistividade ρ (G Ω -m)	1,01	0,98	1,02	1,51
Resistência (G Ω)	1,20	0,90	1,00	1,50
δ	10,56	143,34	76,16	78,69
ξ (10 ⁻⁶)	9,76	6,97	12,61	12,01

Observa-se que a temperatura de sinterização influe no valor da permeabilidade, traduzido por variação de frequência de ressonância, e, consequentemente, nos valores de ξ e δ . Neste caso, deve-se observar que à 1400°C, tem-se a melhor absorção. O valor de μ torna-se maior a partir de 1350 °C, onde pode ser melhor caracterizado visando obter melhores níveis de absorção do material. Esta temperatura será o ponto de referência para sinterizar os aditivos. Os valores de resistências são compatíveis com o nível de especificação de ferritas cerâmicas, conseguindo assim bons valores de absorção.

3.7-PROCESSO DE FABRICAÇÃO DA MANTA

ABSORVEDORA COM ADITIVO

$\text{MnO-MgO-Fe}_2\text{O}_3$

Foi desenvolvido o método de fabricação das mantas absorvedoras à base de resina epóxi, com a composição do aditivo de ferrita $\text{MnO-MgO-Fe}_2\text{O}_3$. Foi estudado o comportamento destas mantas na presença de ondas eletromagnéticas nas faixas de frequências de banda-X.

Foram elaboradas quatro composições diferentes das amostras com revestimento à base de resina epóxi com dois tipos de espessuras, visando observar este efeito no fenômeno de absorção das mantas.

Os protótipos das mantas absorvedoras foram confeccionados nos seguintes laboratórios :

- Laboratórios de Cerâmica da Divisão de Materiais do IAE - Instituto de Aeronáutica e Espaço, onde foram fabricados o pó de ferrita $\text{MnO-MgO-Fe}_2\text{O}_3$.
- Laboratório de Sistemas Eletromagnéticos do IEAv- Instituto de Estudos Avançados, onde foram fabricadas as mantas absorvedoras com diferentes composições.
- Laboratórios Divisão de Confiabilidade Metrológica do IFI (Instituto de Fomento e Coordenação Industrial), onde foram feitas as medidas de absorção.

3.7.1 –COMPOSIÇÃO E FABRICAÇÃO DA FERRITA

$\text{MnO-MgO-Fe}_2\text{O}_3$ PARA SER UTILIZADA NA FORMA DE RESINA EPÓXI

Foram elaboradas quatro diferentes composições, conforme as seguintes etapas:

- Pesagem,

- Mistura do pó em moinho de bolas,
- Pré cozimento em forno programável,
- Micronização ,
- Sinterização,
- Micronização.

3.7.2 – COMPOSIÇÃO E FABRICAÇÃO DA FERRITA

MnO-MgO - Fe₂O₃

3.7.2.1 – FORMULAÇÃO DA FERRITA

De acordo com o diagrama de fases da Figura 3.1, tem-se a região específica, denominada região de absorção, onde foram escolhidos quatro pontos, cujas composições estão ilustradas na Tabela 3.4.

TABELA 3.4 – Tabela inicial de formulação da ferrita dentro da região de absorção

	MnO (%)	MgO (%)	Fe ₂ O ₃ (%)
Amostra 1	10	60	30
Amostra 2	20	50	30
Amostra 3	10	50	40
Amostra 4	16	9	75

3.7.2.2 – SECAGEM EM ESTUFA

Após a moagem, tem-se a descarregamento e uma pesagem, onde a mistura encontra-se em uma forma pastosa, como ilustrada na Figura 3.8. Em uma estufa (Figura 3.9) com a temperatura de 150 °C, durante um período de

3.7.2.2 – MISTURA DO PÓ DE FERRITA $\text{MnO-MgO} - \text{Fe}_2\text{O}_3$

A princípio, para cada amostra, fez-se o seguinte procedimento: em uma balança com um valor de precisão analítica de 0,001g, pesou-se os componentes das amostras, que daí foram colocadas em um moinho de bolas, como ilustrado nas Figura 3.7. A seguir, colocou-se um anti-aglutinante e fechou-se o moinho, colocando-o em operação de moagem durante um período médio de 24 horas (1 dia) com velocidade média de 20 rpm. Foram feitas observações da mistura por intervalo de 6 horas, visando assim um melhor controle de qualidade do produto.

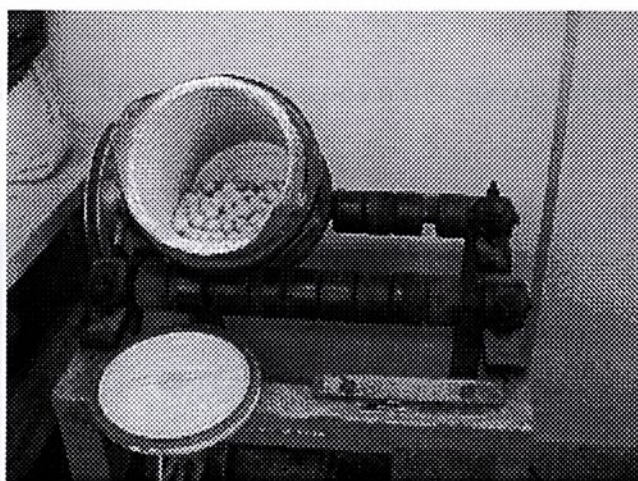


FIGURA 3.7-Moinho de bolas para mistura do pó

3.7.2.3 – SECAGEM EM ESTUFA

Após a moagem, fez-se o descarregamento e uma peneiração, onde a mistura encontra-se em uma forma pastosa, como ilustrado na Figura 3.8. Em uma estufa (Figura 3.9), com a temperatura de 150 °C, durante um período de

8 horas, fez-se a secagem. Logo após, a mistura é retirada e resfriada em ambiente natural, conforme está ilustrado na Figura 3.10.



FIGURA 3.8 – Amostra após o descarregamento.



FIGURA 3.9– Estufa para secagem

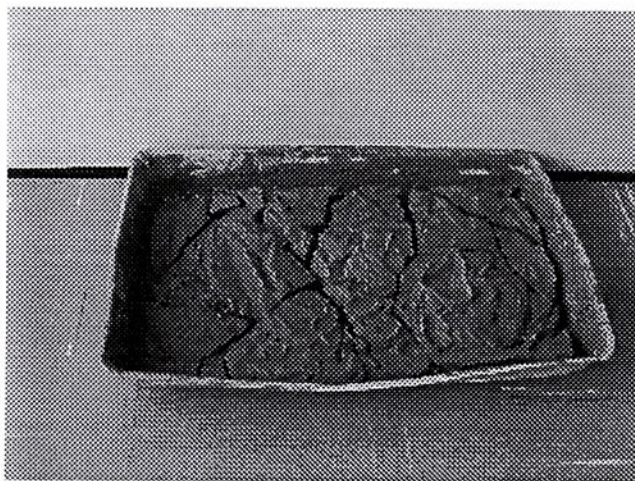


FIGURA 3.10 – Mistura após secagem

3.7.2.4 – MICRONIZAÇÃO

Nesta fase do processo, a mistura é triturada e peneirada manualmente, sendo então colocada num micronizador, com finalidade de obtenção de partículas com dimensões em torno de $10\ \mu\text{m}$. O período de operação foi de 15 minutos, o micronizador que foi utilizado no processo está ilustrado na Figura 3.11. Logo a seguir foi feita uma peneiração para realização da pré-queima do pó.

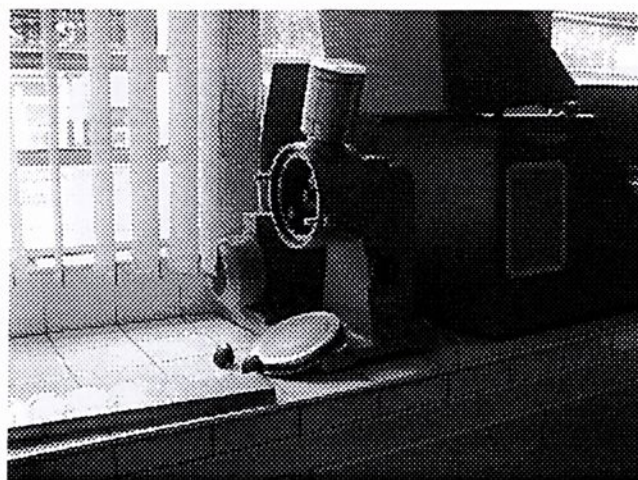


FIGURA 3.11 –Micronizador de partículas

3.7.2.5 – PRÉ-QUEIMA DA MISTURA

Em um forno programável, como ilustrado na Figura 3.12, foi feito o pré-cozimento com injeção de oxigênio, que se constituiu das seguintes etapas: iniciou-se com a temperatura ambiente em torno de 35 °C, e com uma taxa de aquecimento de 200 °C/h, em um intervalo de tempo de 4 horas e 30 minutos, até atingir uma temperatura de 900 °C, estabilizando neste valor por um período de 5 horas com uma taxa de resfriamento de 200°C/h durante um período de tempo de 4 horas e trinta minutos, iniciou-se o resfriamento até atingir a temperatura de 35°C. Logo a seguir, novamente foi feita outra operação de micronização, onde as partículas foram reduzidas ao tamanho de 10µm, na Figura 3.13 está ilustrado o diagrama de operação do processo.

3.2.2.6 - SINTERIZAÇÃO

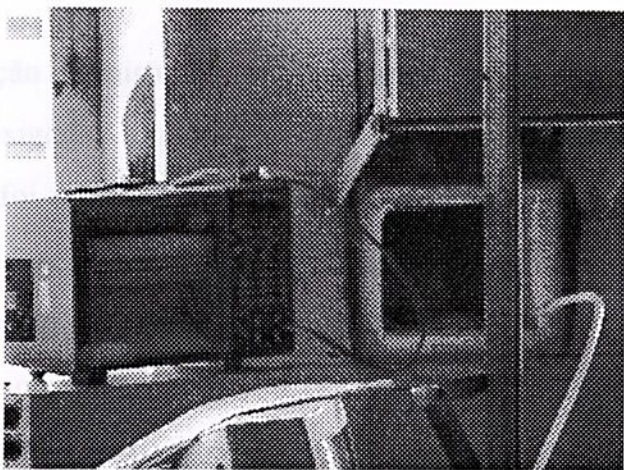


FIGURA 3.12-Formo programável com injeção de oxigênio

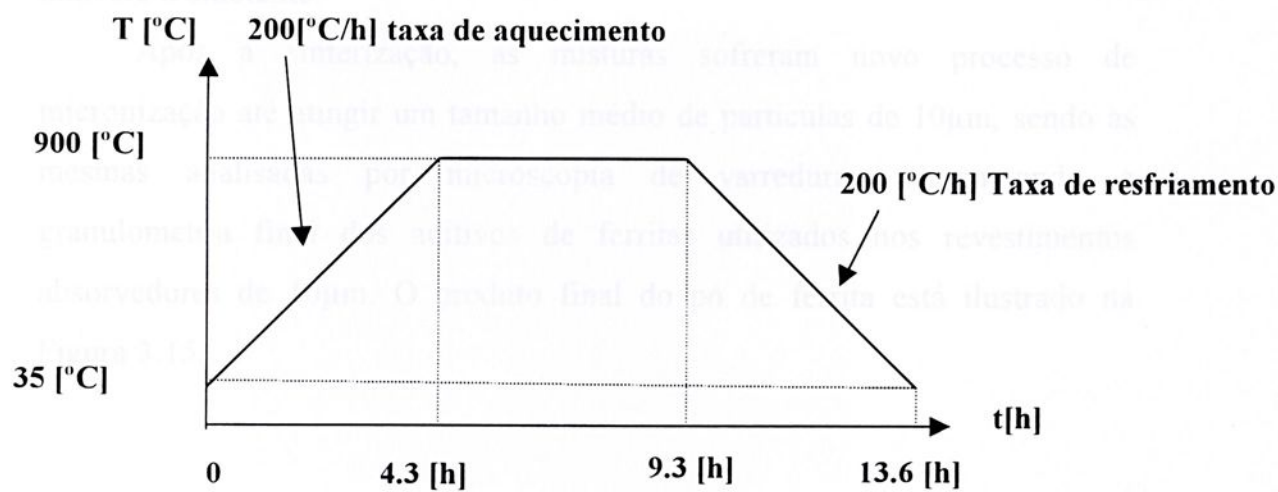


FIGURA 3.13 – Ciclo de tratamento térmico para o pré-queima

3.7.2.6 – SINTERIZAÇÃO

A sinterização da mistura foi realizada em forno programável, também em atmosfera de oxigênio, seguindo a taxa de aquecimento ilustrada na Figura 3.14. A operação foi iniciada numa temperatura ambiente de $t = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$, com uma taxa de aquecimento de 200°C/h , durante um período de 2,5 horas. A atmosfera de oxigênio foi administrada enquanto as amostras estivessem em temperatura igual ou superior a 300°C . Foi estabelecido um patamar de temperatura de 1350°C , por um período de 2 horas. Logo após foi aplicada uma rampa de resfriamento de 200°C/h , até atingir a temperatura inicial do processo, 35°C . Deve-se ressaltar que a injeção de oxigênio foi cessada quando o forno atingiu a temperatura de 300°C , ficando a amostra submetida à atmosfera ambiente.

Após a sinterização, as misturas sofreram novo processo de micronização até atingir um tamanho médio de partículas de $10\mu\text{m}$, sendo as mesmas analisadas por microscopia de varredura, determinando a granulometria final dos aditivos de ferritas utilizados nos revestimentos absorvedores de $10\mu\text{m}$. O produto final do pó de ferrita está ilustrado na Figura 3.15.

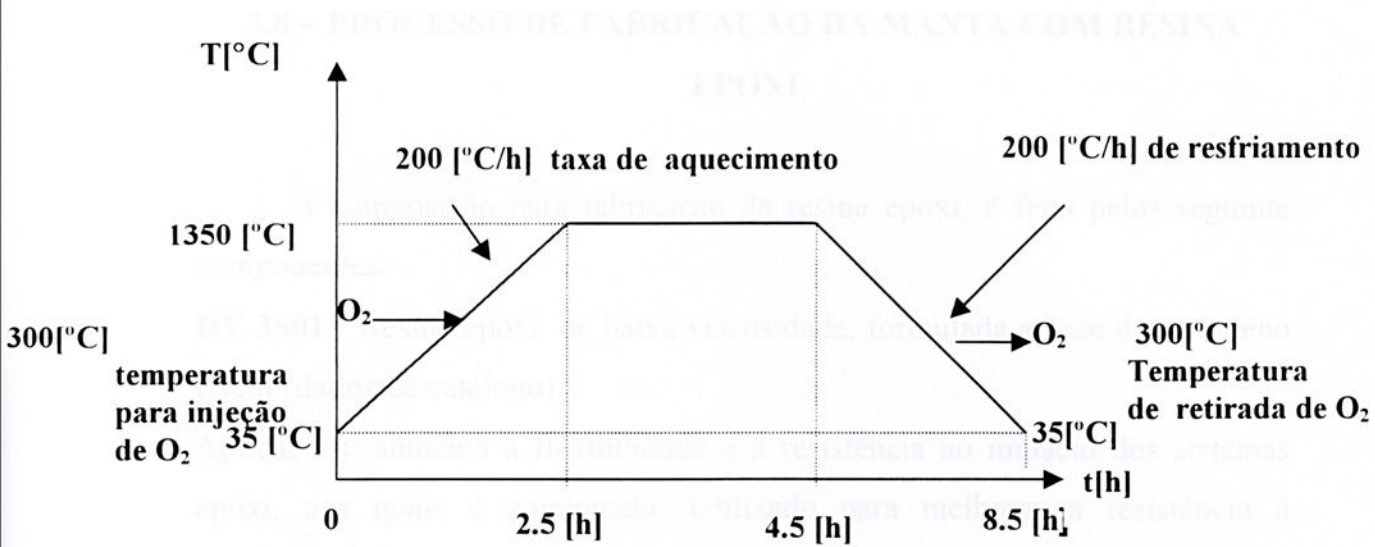


FIGURA 3.14 –Ciclo de tratamento térmico de operação de sinterização

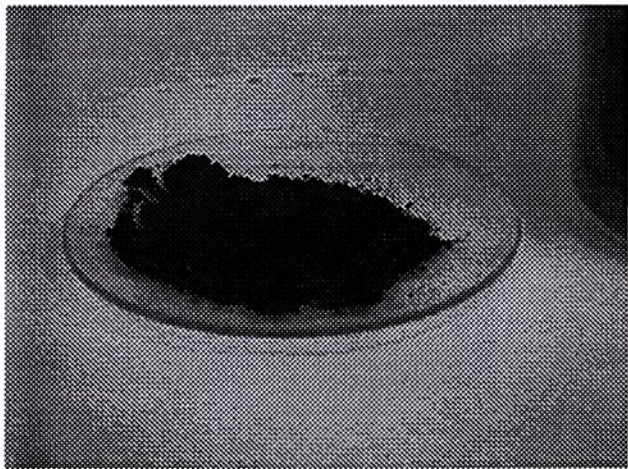


FIGURA 3.15–Produto final do pó de ferrita

3.8 – PROCESSO DE FABRICAÇÃO DA MANTA COM RESINA
EPÓXI

A composição para fabricação da resina epóxi, é feita pelos seguinte componentes:

DY 3601- Resina epóxi de baixa viscosidade, formulada a base de propileno glicol.(dados de catálogo)

Aplicações: aumenta a flexibilidade e a resistência ao impacto dos sistemas epóxi, aos quais é adicionado. Utilizado para melhorar a resistência à formação de placas em “primers” automotivos aplicados através do processo catoforética e para formular revestimentos, bases de pisos, cargas e compostos de vedação de cura em baixa temperatura.

TABELA 3.5 – Dados orientativos: DY 3601 Fabricante CIBA

Estado físico	Liquido
Cor	gardner, ISO 46020
Teor epóxi(ISO 3001)	2,47-2,60 Eq /Kg
Equivalente epóxi	385-405 g/ Eq
Teor de cloro	0-900 ppm
Viscosidade a 25°C	42-52 MPAS

GY 298 – Resina epóxi líquida, alifáticas , modificada de cadeia longa
Aplicações: o araldite GY298 misturado com resinas epóxi aromáticas, não modificadas e com bicamadas com endurecedores de policimina ou seus adutos, é apropriada à flexibilização de revestimentos de pisos sem solventes.

TABELA 3.6 – Dados orientativos : GY 298- Fabricante CIBA

Estado físico	Líquido
Equivalente epóxi	2000-4000 g/Eq
Viscosidade 25°C	400-455 MPAS
Teor epóxi	2,2-2,5 Eq/Kg
Peso específico	1,13 g/cm ³

TABELA 3.7 – Dados orientativos : HY 840 - Endurecedor -Fabricante CIBA

Viscosidade	10000-15000 MPAS
Índice de amina	6,59-7,30 Mg/KOH/g
Peso específico	0,95 g/cm ³

NEGRO DE FUMO-NF[(Marques&Varanda, 1988; Nohara, 1998)

O negro de fumo é um dos aditivos comerciais mais utilizados, sendo que é um material da classe carbonoso poliméricos, similar ao grafite, pois é também condutor de eletricidade. Foi usado em laboratório, uma pequena quantidade, visando não alterar a condutividade elétrica do material (Rodriguez,1989; Society of the Plastic Industry, 1991) e visando também o endurecimento do material. Geralmente, os NF são amplamente empregados industrialmente visando oferecer resinas eletricamente condutoras, A seleção apropriada do tipo NF condutor a ser utilizado como aditivo é crítica para determinadas formulações, pois dessa seleção dependem parâmetros como: incorporação deste componente no veículo, a condutividade, as propriedades físicas, a processibilidade, a dispersão e o custo. Para propriedades como: área

superficial, estrutura, tipos de partícula do pó, caracterizam as propriedades físicas do agregado e influenciam no grau de condutividade desejado do NF. A área superficial caracteriza o tamanho da partícula e seu grau de microporosidade, por isto a pequena quantidade de NF , não influi na viscosidade da mistura (Silva et al, 1999; Dias, 1988).

A composição GY298, HY840, DY 3601 e NF, junto com a composição de ferrita, temo os componentes necessários para fabricar a manta eletromagnética.

3.8.1 – COMPOSIÇÃO DAS AMOSTRAS DAS MANTAS

Segundo Migliano, 1998, para testes em termos de absorção de ondas eletromagnéticas a composição da resina escolhida para fabricação das mantas está na Tabela 3.8. Para este processo que se deseja analisar, escolhe-se duas espessuras de mantas: 1mm e 2mm .

TABELA 3.8 – Composição das resinas

HY 840	DY 3601	GY 298
20 %	33,5 %	46,5 %

A manta inicial escolhida tem as dimensões: de 32cmx44,5cmx0,1cm, composição igual a 75% de resina e 25% de ferrita. Para as dimensões da referida manta, tem-se os seguintes pesos da Tabela 3.9:

TABELA 3.9 – Pesos dos componentes da resina

HY840	DY3601	GY 298
24 g	40g	55,6 g

3.8.2 - DENSIDADE DA FERRITA

As quatro amostras têm as densidades conforme Tabela 3.10 :

TABELA 3.10 – Densidade das amostras

densidade g/cm ³

Amostra	densidade
Amostra 1	1,87
Amostra 2	2,08
Amostra 3	2,08
Amostra 4	1,95

3.8.3 – CÁLCULO DA COMPOSIÇÃO DA RESINA EPÓXI

A resina epóxi, experimentalmente, tem a composição com as respectivas densidades mostradas na Tabela 3.11.

**TABELA 3.11 – Composição e densidades da resina
g/cm³**

Resina	Composição	densidade
HP 840	20 %	0,97
GY 298	46,5%	1,13
DY 3601	33,5%	1,03

Como o experimento exigia duas espessuras, fez-se os mesmos cálculos para a manta de espessura V=320 mm x 445mm x 2mm, resultando os seguintes dados da Tabela 3.12.

**TABELA 3.12-Composição epóxi nas mantas com as
dimensões: 320 mm x 445mm x 1mm
(g)**

Resina	Quantidade (g)
HP 840	24,00
DY 3601	40,00
GY 298	55,60

Pelos mesmos procedimentos fez-se as composições para as mantas com dimensões 320 mm x 445mm x 2mm, como ilustrado na Tabela 3.13.

TABELA 3.13-Composição epóxi nas mantas com as dimensões 320 mm x 445mm x 2mm (g)

Resina	Quantidade (g)
HP 840	47,80
DY 3601	80,14
GY 298	11,24

3.8.4 – COMPOSIÇÃO FINAL DA MASSA

Nas amostras citadas acima, tem-se as composições finais das mantas, sendo que nos dois casos de espessura das mantas, o elemento negro de fumo, foi usado apenas uma pequena porção de 0,276 g, justamente para garantir a dureza do epóxi. Com isso nas Tabelas 3.14 e 3.15, estão ilustrados os dados das mantas com as respectivas espessuras.

TABELA 3.14-Composição das mantas com as dimensões 320 mm x 445mm x 1mm

Mantas	HP840 (g)	DY 3601 (g)	GY 298 (g)	Densidade das composições (g/cm ³)	Massa da ferrita (g)
Manta 1	42	70,5	97,7	1,97	179,80
Manta2	42	70,5	97,7	2,08	177,72
Manta3	42	70,5	97,7	2,08	177,72
Manta 4	42	70,5	97,7	1,95	166,61

TABELA 3.15-Composição das mantas com as dimensões 320 mm x 445mm x 2mm

Mantas	HP840 (g)	DY 3601 (g)	GY 298 (g)	Densidade das composições (g/cm ³)	Massa da ferrita (g)
Manta 1	24	40	55,60	1,97	75,00
Manta2	24	40	55,60	2,08	74,00
Manta3	24	40	55,60	2,08	74,00
Manta 4	24	40	55,60	1,95	73,50

Foram feitas as respectivas misturas para cada manta, e colocadas em uma forma, são levadas ao forno, como ilustrado na Figura 3.16, para aquecimento, em uma temperatura de 50 °C, durante um período de 60 minutos, sendo que o resfriamento ocorreu em um período de 20 minutos. Logo após fez-se os descarregamentos das mantas, que foram guardadas para posterior ensaio. Estão ilustradas nas Figuras 3.17 e 3.18 as mantas em sua forma final.

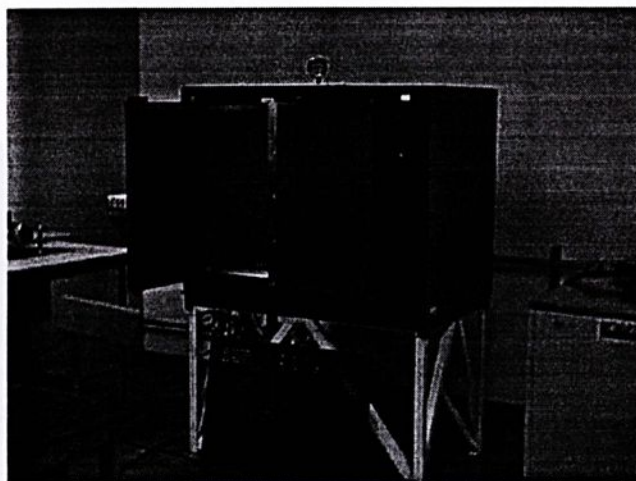


FIGURA 3.16 – Forno de cozimento.

FIGURA 3.18 -Mantas com as dimensões
320 mm x 443mm x 1mm



**FIGURA 3.17 – Mantas com as dimensões
320 mm x 445mm x 2mm**



**FIGURA 3.18 -Mantas com as dimensões
320 mm x 445mm x 1mm**

3.9 - ENSAIOS E ANÁLISE DE RESULTADOS

3.9.1 – INSTRUMENTAÇÃO

A parte experimental do sistema está ilustrado nas Figuras 3.19 e 3.20, sendo que esta instrumentação foi utilizada para cálculo das medidas de refletividade, a relação entre a perda de reflexão e a porcentagem de absorção de radiação .

O método utilizado foi o arco NRL (Naval Research Laboratory) onde caracterizou-se a absorção pelo sistema de ondas (Migliano et al,1999; Skolnik,1970; Halliday,1984; Knot et al,1985). A faixa de frequência de teste foi de 8-12 GHz, sendo que melhor frequência de operação é de 10 GHz .

Estas medidas foram realizadas nos Divisão de Confiabilidade Metrológica do IFI (Instituto de Fomento e Coordenação Industrial), onde os software são específicos, e os valores de refletividade caracterizam a absorção das mantas absorvedoras, que contém a ferrita de composição $\text{MgO-MnO-Fe}_2\text{O}_3$.

3.9.2 - MÉTODO DO ARCO NRL

O método do arco NRL foi conseguido pelo Laboratório Naval de Pesquisas dos Estado Unidos da América (Migliano et al, 1999; Skolnik, 1970; Halliday, 1984), visando caracterizar o material de absorvedores de microondas (Migliano et al,1999; Migliano et al,1998). As Figuras 3.19 e 3.20 ilustram o sistema, onde se aplica o método.

O arco, como ilustrado na figura 3.21, é composto de duas antenas: transmissora e receptora, classificada como tipo corneta. A estrutura do arco é projetada de modo manter a antena apontada para o centro da amostra em



teste, na placa de metal, utilizada como referência (Migliano et al,1999; Migliano et al, 1998, Wallace, 1993).

O sistema consiste em:

- gerador de varredura , que permite a transmissão em faixa de frequências pré determinada;
- analisador de espectro (para receber osinal refletido);
- cornetas transmissora e receptora.

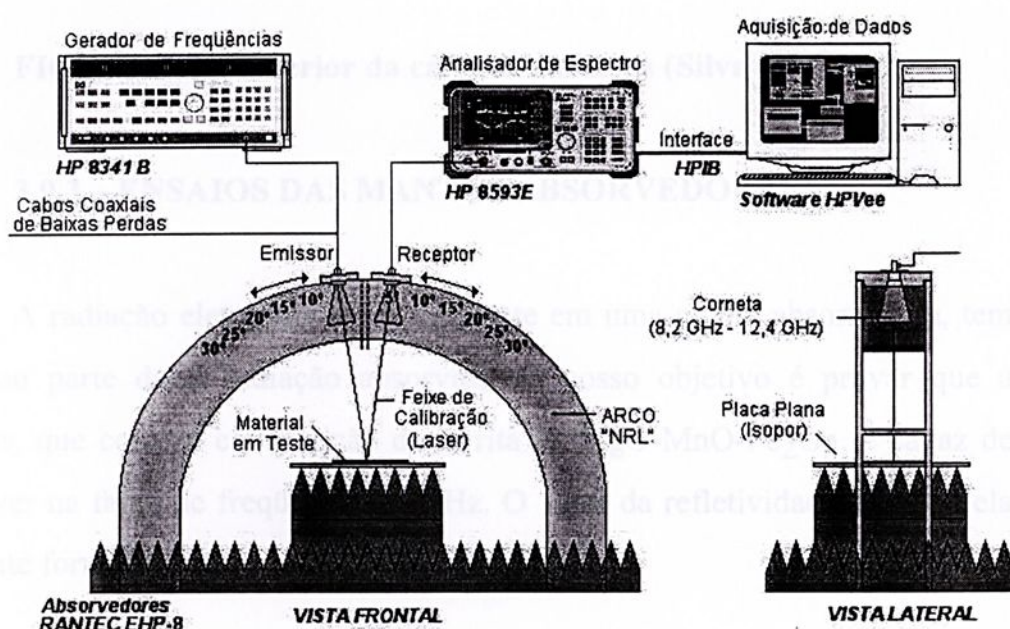


FIGURA 3.19- Arco NRL utilizado para medidas de Refletividade (Silva et al,1999)

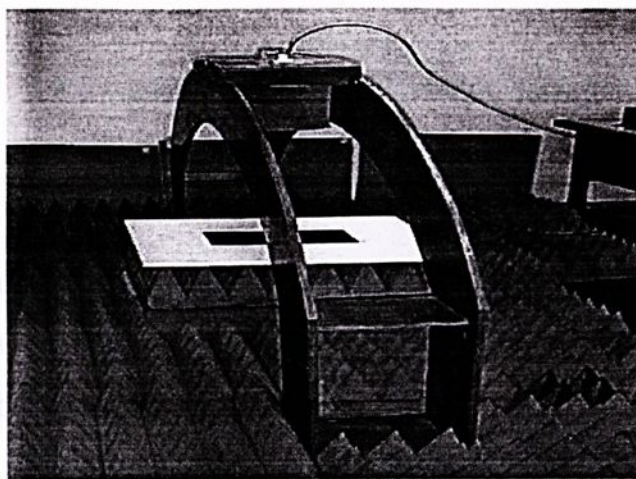


FIGURA 3.20- Interior da câmara anecóica (Silva et al,1999)

3.9.3 – ENSAIOS DAS MANTAS ABSORVEDORAS

A radiação eletromagnética incidente em uma manta absorvedora, tem toda ou parte desta radiação absorvida. O nosso objetivo é provar que a mantas, que contém composição de ferrita de $\text{MgO-MnO-Fe}_2\text{O}_3$, é capaz de absorver na faixa de frequência de GHz. O valor da refletividade é dado pela seguinte formula:

$$\text{Refletividade(dB)}=20\log(A_{\text{ref}}/A_{\text{inc}}) \quad (3.7)$$

Sendo que A_{ref} = energia elétrica refletida

A_{inc} : energia eletromagnética incidente

Foram feitas 8 medidas, sendo 4 medidas de um lado denominado rugoso e a outra face denominada lisa, devido as características de fabricação das mantas.

3.9.4 – TESTES REALIZADOS NAS MANTAS ABSORVEDORAS

Inicialmente coloca-se uma placa metálica onde nota-se que esta curva não interfere no sinal, as Figuras dos resultados (Capítulo 4) mostram os efeitos e a absorções das mantas.

Os gráficos com os resultados serão discutidos no Capítulo 4, onde são observados a refletividade e absorção das ondas eletromagnéticas nas mantas, caracterizando assim uma aplicação no setor aeroespacial, como blindagens de circuitos eletrônicos e sistemas absorvedores de ondas eletromagnéticas na banda-X de microondas.

445mm x 2mm



FIGURA 4.1 – Gráfico de absorção 1- banda X- manta I

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

4.1 – TESTES REALIZADOS NAS MANTAS ABSORVEDORAS

Dê acordo com os procedimentos descritos no Capítulo 3, inicialmente coloca-se uma placa metálica limpa como referência, a seguir colocam-se as mantas, e com a onda refletida pode-se observar os efeitos de absorções das mesmas. Na Tabela 3.15,(Capítulo 3) estão descritas as composições dos corpo-de-prova.

Os corpo-de-prova ensaiados tem as seguintes dimensões: 320 mm x 445mm x 2mm

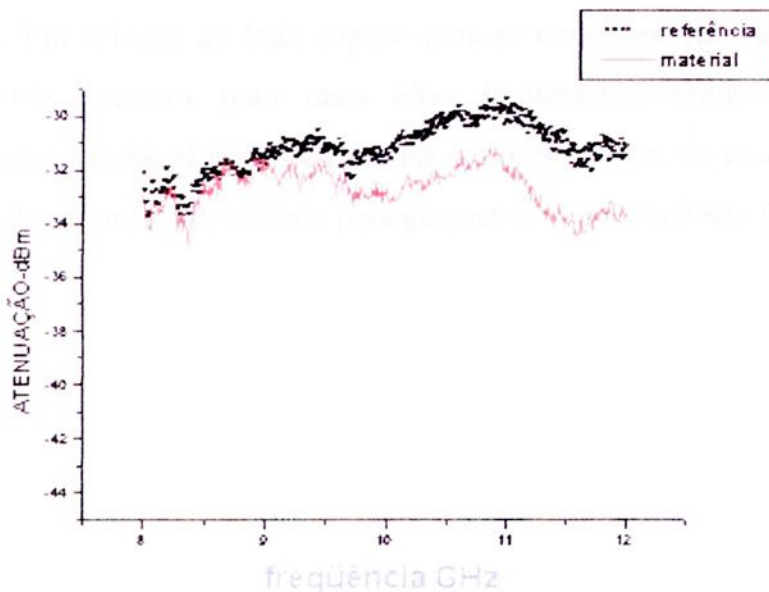


FIGURA 4.1 – Corpo-de-prova 1- lado liso-manta 1

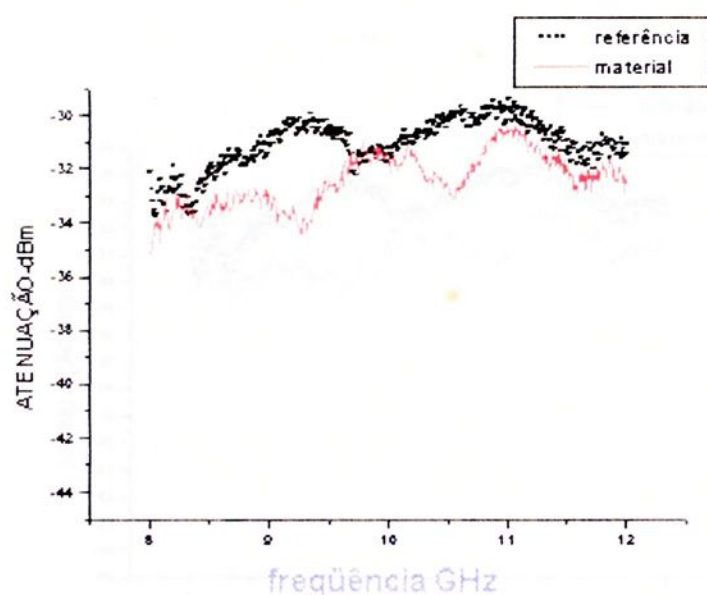


FIGURA 4.2 – Corpo-de-prova 1- lado rugoso – manta 1

Figuras 4.1 e 4.2- Corpo-de-prova 1: Neste caso, no lado liso, nota-se uma pequena refletividade antes da frequência de 10 GHz, tendendo a um crescimento de absorção para frequências acima, chegando a valor em torno de 3 dB. Em relação ao lado rugoso nota-se uma absorção acima de 8,5 GHz, tendendo diminuir para mais altas frequências, sendo que, neste caso permanece instável para frequências maiores. Porém no caso rugoso, deve-se parte da absorção ser afetada pela geometria da manta e não pela composição

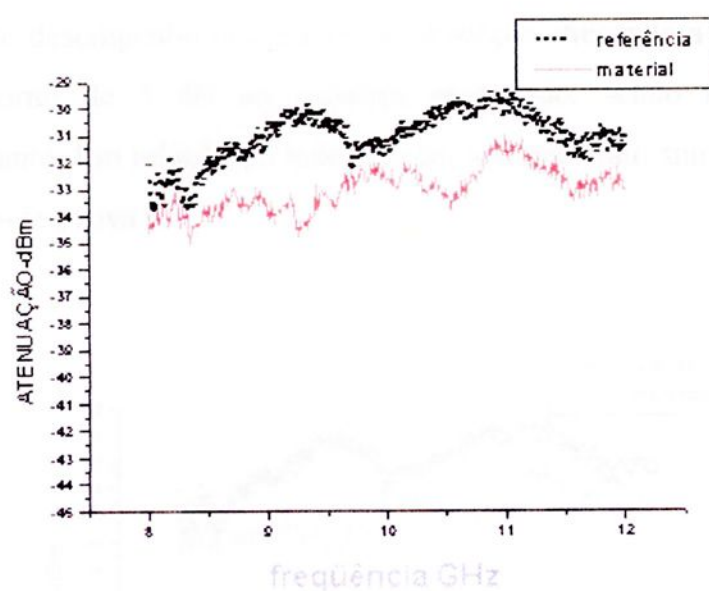


FIGURA 4.3 – Corpo-de-prova 2 – lado liso –manta2

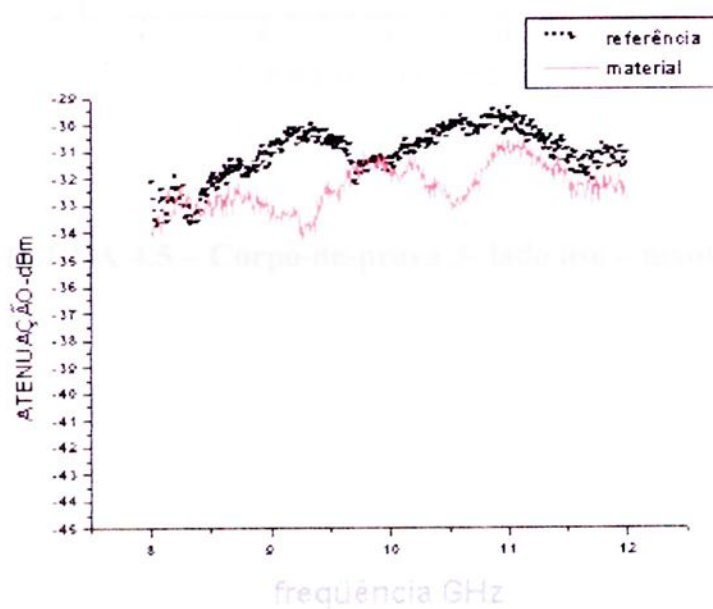


FIGURA 4.4 – Corpo-de-prova 2 –lado rugoso – manta 2

Figuras 4.3 e 4.4 - Corpo-de-prova 2:. Nota-se que o lado liso tem um grande desempenho em termos de absorção chegando a manter uma absorção em torno de 3 dB no espectro estipulado, sendo neste caso mantendo constante. Em relação ao lado rugoso, acontece fato similar ao lado rugoso do corpo-de-prova 1.

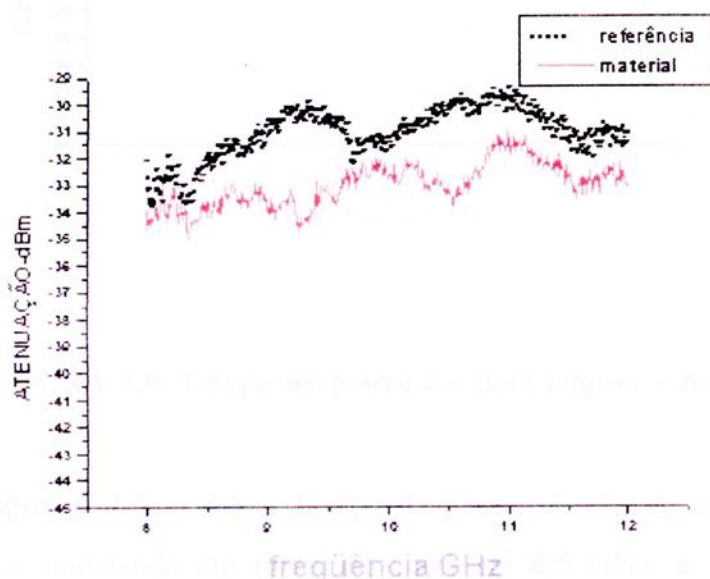


FIGURA 4.5 – Corpo-de-prova 3- lado liso – manta 3

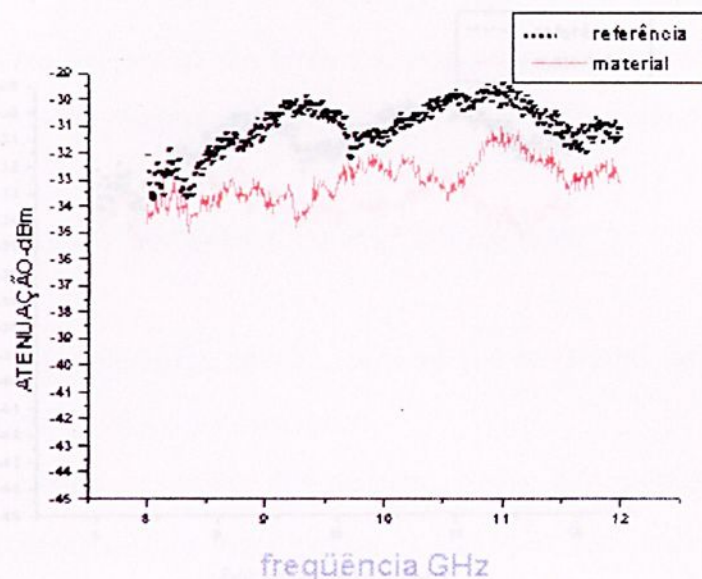


FIGURA 4.6- Corpo-de-prova 3 – lado rugoso - manta 3

Figuras 4.5 e 4.6 - Corpo-de-prova 3 Neste caso no lado liso, permanece inalterado em torno do valor até 8,5 GHz, a partir deste valor inicia-se a absorção em torno de 3dB, permanecendo inalterada para frequências superiores. No caso, no lado rugoso, nota-se, que absorção vem das frequências inferiores a 11,5 GHz, sendo que a absorção está em frequências mais baixas em relação a este valor.

FIGURA 4.8 -Corpo-de-prova 4- lado rugoso – manta 4

Figuras 4.7 e 4.8 - Corpo-de-prova 4: Neste caso, tanto o lado liso, como o lado rugoso, mantêm uma absorção constante, para o espectro de

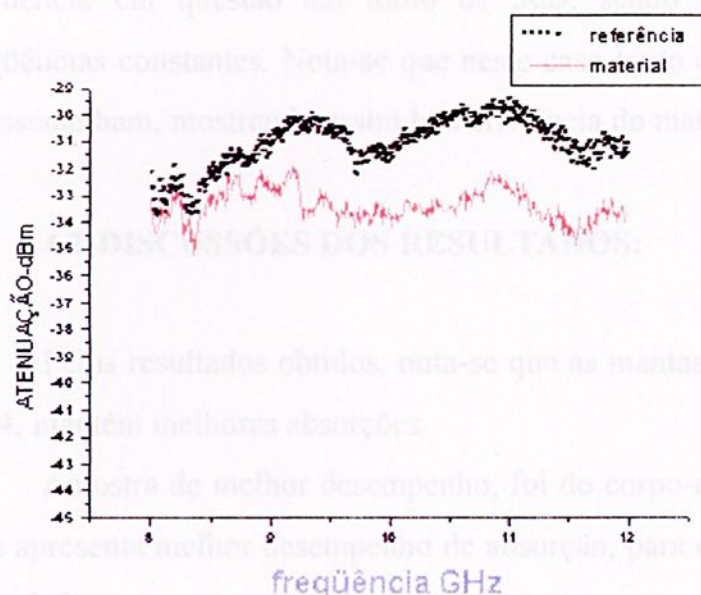


FIGURA 4.7- Corpo-de-prova 4 – lado liso – manta 4

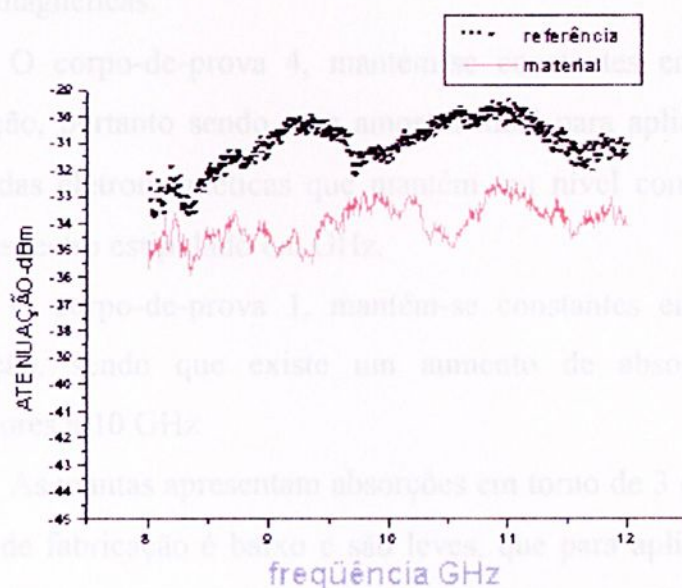


FIGURA 4.8 –Corpo-de-prova 4- lado rugoso – manta 4

Figuras 4.7 e 4.8 - Corpo-de-prova 4: Neste caso, tanto o lado liso, como o lado rugoso, mantém uma absorção constante, para o espectro de

freqüência em questão em torno de 3dB, sendo uma boa manta para freqüências constantes. Nota-se que neste caso tanto o lado liso como rugoso se assemelham, mostrando assim boa eficiência do material.

4.2-DISCUSSÕES DOS RESULTADOS:

Pelos resultados obtidos, nota-se que as mantas dos corpos-de-prova 2, 3 e 4, mantém melhores absorções.

Amostra de melhor desempenho, foi do corpo-de-prova 4, no lado liso, pois apresenta melhor desempenho de absorção, para o espectro de freqüência estipulado.

O corpo-de-prova 3, mostra uma boa composição para desempenho em freqüências inferiores, sendo então otimizadas para utilização em freqüência inferiores a 11,5 GHz, sendo muito boas para pesquisas em blindagens eletromagnéticas.

O corpo-de-prova 4, mantém-se constantes em relação ao nível de absorção, portanto sendo uma amostra ideal para aplicação em absorvedores de ondas eletromagnéticas que mantém um nível constante de absorção em todo espectro estipulado em GHz.

O corpo-de-prova 1, mantém-se constantes em relação ao nível de absorção, sendo que existe um aumento de absorção para freqüências superiores a 10 GHz.

As mantas apresentam absorções em torno de 3 dB, e observa-se, que o custo de fabricação é baixo e são leves, que para aplicações aeroespaciais, é um parâmetro e grande importância, devido ao peso de equipamentos, no que relaciona-se com blindagens eletromagnéticas.

O método do Arco NRL, é bastante preciso e de fácil execução, visto que o nível de precisão é melhor em relação ao método da cavidade



ressonante, onde necessita-se acabamentos de precisão de mecânica fina para a cavidade ressonante.

As mantas já estão sendo aplicadas em blindagens de equipamentos eletrônicos, em proteção de emissão irradiada em Ensaios de EMI/EMC. Com pequenas modificações elas podem ser empregadas no setor aeronáutico

1°. Pelos resultados obtidos, verifica-se que as mantas desenvolvidas absorvem ondas eletromagnéticas na faixa de banda-X de microondas, para aplicação no setor aeroespacial na faixa de 8GHz.

2°. Dados experimentais comprovaram que a ferrita à base de $\text{MnO-MgO-Fe}_2\text{O}_3$ foi de grande eficiência para operação em torção de 10GHz, conforme os dados obtidos pela amostra.

3°. O aditivo $\text{MnO-MgO-Fe}_2\text{O}_3$ tem peso específico baixo, o que é desejável para aplicações espaciais, sendo um parâmetro importante nas blindagens de equipamentos eletrônicos. Isto é, visa-se a otimização global em termos de peso de veículos lançadores, que deve ser menor possível, devido a economia de gasto de combustível.

4°. De acordo com os resultados obtidos, ferritas com a composição $0,6\text{MgO} \cdot 1\text{MnO} \cdot 3\text{Fe}_2\text{O}_3$, caracterizadas a 10 GHz, apresentaram poucas perdas e, como a frequência de ressonância da cavidade varia substancialmente com a temperatura de fabricação. Fica claro que as propriedades eletromagnéticas do material variam acidentalmente com o modo de fabricação em banda-X. O valor de μ torna-se um importante parâmetro para pesquisa da caracterização da absorção pelo efeito pelicular ("skin"), sendo estes resultados importantes para o desenvolvimento e fabricação de ferritas nas frequências banda-X. Isto permite verificar a temperatura ideal para sinterização da ferrita a ser aplicada.

5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 – CONCLUSÕES

1^a. Pelos resultados obtidos, certifica-se que as mantas desenvolvidas absorvem ondas eletromagnéticas na faixa de banda-X de microondas, para aplicação no setor aeroespacial na faixa de 8GHz.

2^a. Dados experimentais comprovaram que a ferrita à base de $\text{MnO-MgO-Fe}_2\text{O}_3$ foi de grande eficiência para operação em torno de 10GHz, conforme os dados obtidos pela amostra2. .

3^a. O aditivo $\text{MnO-MgO-Fe}_2\text{O}_3$ tem peso específico baixo, o que é desejável para aplicações espaciais, sendo um parâmetro importante nas blindagens de equipamentos eletrônicos. Isto é, visa-se a otimização global em termos de peso de veículos lançadores, que deve ser menor possível, devido a economia de gasto de combustível. .

4^a. De acordo com os resultados obtidos, ferritas com a composição $6\text{MgO} \cdot 1\text{MnO} \cdot 3\text{Fe}_2\text{O}_3$, caracterizadas a 10 GHz, apresentaram poucas perdas e, como a frequência de ressonância da cavidade variou substancialmente com a temperatura de fabricação. Fica claro que as propriedades eletromagnéticas do material variam acentuadamente com o modo de fabricação em banda-X. O valor de μ torna-se um importante parâmetro para pesquisa da caracterização da absorção pelo do efeito pelicular (“skin”), sendo estes resultados importantes para o desenvolvimento e fabricação de ferritas nas frequências banda-X. Isto permite verificar a temperatura ideal para sinterização da ferrita a ser aplicada. .

5.2-SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.

. A aplicação destas mantas pode ser usada para encapar conectores, visando a eliminação de ruídos elétricos de uma forma geral, tanto industrial como aeroespacial.

. Analisar os efeitos de refletividade(antenas) de acordo com a composição de algumas mantas, visando, de uma maneira geral, aplicações em microondas.

. Pesquisas destas mantas na área de ciências médicas para proteção de efeitos biológicos, utilizando em proteção contra radiações eletromagnéticas. .

. Pesquisas de aditivos complementados com Zn na composição de mantas para análise de melhoria de desempenho em nível de absorção. .

. Pesquisas de novos pontos do diagrama $\text{MnO-MgO-Fe}_2\text{O}_3$, para otimizar maiores níveis de absorção dentro do espectro eletromagnético. .



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A.I.M.E. *Industrial minerals and rock*, , New York: American Institute of Mining Engineers Metallurgical and Engineers Petroleum, 1949.

ALFREY, T., *Molecular structure and mechanical behavior of high polymers the science and engineering materials*, New York: John Wiley & Sons, 1957.

ALBERS, S. E., Ferrites for microwave and digital computers, *J. A*, p.25, p.152- 154, 1954.

ALBERS,S.E, SCHOEMBERG, E . Ferrites for microwave circuits and digital computers. *Journal of Application Physics*, v.25, p. 152-154, 1954.

ALTSCHULER, H.M. Dielectric constant In: MICROWAVE RESEARCH INSTITUTE. *Handbook of microwave masurements*. 3. Th. New York: Polytechnic Press, 1963. V2. P.495-548

AMERICAN SOCIETY MICROWAVES, *Magnetic material for the microwave region*, , vol 4, 1980, [s.n-s.l]

BELJERS,H.G. Faraday effect in magnetic materials with travelling and standing waves: *Phil. Res. Rep.* v.9, p.131-139, 1954.

BERTARD & FORRAT, Struture des ferrites ferrimagnetics des terres rares *Comp. Rend*, v.242, p.242-283, 1956.



BROSE A. et al, Ferrites magnetics. *Mater. Sci. Eng.*, v.3,p.317,1968.

BUTTON, S. T. *Metodologia para planejamento experimental e análise de resultados*, Campinas:UNICAMP,1996,80p. (apostila do curso IM 317).

BUCHANAN, R. C.(Ed.) CERAMIC Materials for Eletronics: processing, properties and applications; 2th, New York: Marcel Dekker Inc., 1991. 531p.

CALLISTER, W.D.JR. *Materials science and enginiering - an introduction* 3^a ed.,New York: John Wiley & Sons, 1994. 210 p.

CENTRO TÉCNICO AEROESPACIAL *PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE MONITOR DE CORRENTE DE ELÉTRONS NÃO INTERCEPTANTE*, Código do Registro:PI9902434, JUN/99.

CENTRO TÉCNICO AEROESPACIAL *PROCESSO PARA OBTENÇÃO DE REVESTIMENTOS ABSORVEDORES DE MICROONDAS 2 -20 GHz À BASE DE POLIURETANOS E RESINAS EPOXI ADITADOS COM PARTICULAS DE CARBONO E FERRITAS*, Código de Registro:PI9805581, DEZ/1998,

CENTRO TÉCNICO AEROESPACIAL *PROCESSO PARA OBTENÇÃO DE MANTA FLEXÍVEL PARA ABSORÇÃO DE RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA NA FAIXA DE 2 - 20 GHz À BASE DE POLIURETANOS ADITADOS COM FERRITA, FIBRAS E/OU PARTÍCULAS DE CARBONO*, Depósito em Dez/98 Código do Registro: PI9806680, , DEZ/1998.

CHARMERS, B. *Physical mettalurgy*, New York: Wiley & Sons, [s.d.].



CLARRIOATS, P.J.B. *Microwave ferrite* London: Chapnav Hall, 1961.T.p.412

COM H. et al hohlleiter-bauelement der micro-wellentechnik In 4 GHz,
Bireicht-sel Nochr, v.7, n.3, p.140-150,1959.

CONTRIN, A.A.M.D. *Instalações elétricas*. 3ª ed. São Paulo:

Makron Books,1992. 300p.

DIAS, J.C., *A absorção de ácidos carboxílicos em carvão ativado: comparação isotermas de Freundlich e Freundlich estendida*, 1980, Dissertação (Mestrado em Química), ITA, São José dos Campos, 1998.

EDIMINISTER, J. A. *Eletromagnetismo*, São Paulo: MacGraw Hill,1982.140p.

ENOUMOS G., Ferrites on microwave, *Am. Ceramic Soc.*,38(7)

241-1955,38(8)292-1955,38(9),335-1955.

FOX, J. ; SUCHER M. *Handbook of microwave measurements*, Polytechnic
Institute of Brooklin, Microwave Research Institute, 3 th., 1963.

FREITAS, C. A. R.; MELO,F.L.C.; ORLANDO A. J. F; Elaboração de ferritas a base de Mg-MnO-Fe₂O₃ para aplicação em banda-x de microondas.In:
CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALÚRGIA E DE MATERAIS, 1, 2000, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro:ABCM, 2000

FREITAS, C.A.R. *Análise das interferências eletromagnéticas em sistemas de medição e controle*. Itajubá, 1996. 250p. Dissertação de Mestrado em Automação e Controle Industrial-EFEI,Itajubá,M.G.

FRESH, D.L.. Methods of preparation and crystal chemistry of ferrites.

Proceedings IRE ver 4, p. 1803-1311, 1966..

GELLER Z., *Kristallogr.*, p. 125, 1957. [s.n-s.l]

GILLES, M.A. *Ferromagnetic materials*, New York: North Holland, , 1980. V. 2, 200p.

GUY, A. G. *Elements of physical metallurgy*, New York: John Wiley & Sons 1959. 200 p.

HALLIDAY, D. ; RESNICK, R. *Eletromagnetismo*, 3ª ed., Rio de Janeiro: Livros Técnicos, 1984. 210 p.

HAWTHORNE, F.C. *J.Solid State Chem.*, v.37, p.37157, 1981.

HECK, I.C. *Magnetic materials and their applications*, London: Butterworths, [196?].

HOGAN, C.L. The ferromagnetic Faraday effect at microwave frequencies and its application: microwave gyrator. *Bell System Tech. J.* v.31, p.204-210, 1952.

JONES V.R. Ferrites reports *IEEE Trans. Son.Ultrason*, SU-13, p.86, 1986.

KATSURA T.; WAKIHARA I. et al, Ferrites. *J.Phys.Chem.Solids.*, v.13, p. 107-113, 1975.



- KINGERY, W.D., *Introduction to ceramics*, New York: John Wiley & Sons, 1960. 249 p.
- KITTEL, C. On the theory of ferromagnetic resonance absorption *Phys. Rev.*, v.73, p.155-161, 1948.
- KLINGSHERG C. *Physics and chemistry of ceramics*, New York: Gordon and Beach, 1963.
- KNOT, E.F.; SCHAEFFER, J.F.; TUELEY, M.T. *Radar cross section*, New Jersey: Artech House, 1985.
- LANGLEY, H.R.; STURGEON D.G. Magnetics ferrites applications, *J. Solid State Chem.*, v.30, p.79, 1979.
- LAX, B. *Microwave ferrites and ferromagnetics*, New York: Mac Graw Hill, 1962.
- LJUNG, P.E. Developement for Faraday rotation at wavelenghts of 3,6 and 10 cm. *Proc. IEE*, v.104B, p.154-158, 1957.
- MARQUES, R.F.C ; VARANDA, L.C., *Materiais magnéticos propriedades, obtenção, aplicações tecnológicas*; UNESP, Araraquara, Monografia, 1988. [s.n s.l.]



- MARQUES,R.F.C., VARANDA , L.C. , *Materiais magnéticos propriedades, obtenção e aplicações tecnológicas*, Rio de Janeiro:livro técnico, 1985,240p.[55] JUNIOR, M.J. Absorvedores de radiação eletromagnética In: ENCONTRO TÉCNICO DE MATERIAIS E QUÍMICA, 2, 1999, Rio de Janeiro *Anais...*,16-18, setembro, IPQM, RJ, 1999.
- MEYER, F.W.B. *Polymer Chemistry*, New York: Interscience publishers, [s.n-s.l].1957.
- MIGLIANO, A.C.C. *Circuitos magnéticos*. São José dos Campos, 1990, (curso do Projeto de Preparação de Especialistas para Setor Aeroespacial), [s.n-s.l],1990.
- MIGLIANO, A.C.C., et al., *Absorvedores de radiação eletromagnética Aplicados no setor aeronáutico* , In, In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE TINTAS 6º, 1999, Rio de Janeiro. *Anais..* Rio de Janeiro,1999 v.2.
- MIGLIANO, A.C.C.; POLLI Y.R.; STOPA C.R.; et al, Finite element analysis of impedance of an electron beam current monitor,H BIENNAL IEEE CONFERENCE ON ELETROMAGNETIC FIELD COMPUTATION, IEEE CEFC'98, Tucson, Arizona, USA, pp. 316, june 1-3, 1988. *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 35, nº3, pp1833-1836, may 1999.

- MIGLIANO, A.C.C.; POLLI Y.R.; STOPA C.R.; et al, Simulation of the electron beam current monitor using a finite element method coupled with circuit. *Anais The Brazilian Conference on Eletromagnetics- CBMAG 98* - São Paulo, pp. 284-287, ed. Sociedade Brasileira de Eletromagnetismo, 1998.v.1.
- MORRISSON, R.; LEWIS, W.H. *Grounding and shielding in facilities*, New York John Wiley & Sons, 1990. 120 p.
- MSFOUR et al. Measuring of the properties of materials. *Proceedings of the IEEE*, v.74, n.1, p.185-189, 1986.
- NISHIKAWA, S. Ferrites, *Proceedings Tokyo. Math.Phys.Soc.*, 8, 119, 1950.
- NOHARA, E.L. *Estabelecimento de parâmetros de processamento de compósitos carbono/carbono aplicados na área de elementos de fricção*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica Aeronáutica, ITA, S.J dos Campos, SP, 1998.
- O'CONNOR M.; BELSON H. Notes of ferrites, *J.Appl.Phys.*, v.41, p.1028, 1970.
- OHTA K., *J. Phys. Soc.*, v.5, p.2789, 1980.
- OKAMURA, T.; TORIZULCA, Y. Microwave resonance absorption in NiOFe_2O_3 and magnetic transacional at low temperature, *Sci. Rep. Res. Inst. Tohaku. University*, v.2, n. A3, p.663-772, 1951.

PRINGLE, D.H.; HELP BURN, W.D. Some problems in preparation of ferrites for microwaves devices. *In Solid State Physics*, v. 3, ed. Deserat and Michels, Academic Press, London, p.252-269, 1960.

QUEVEDO, C.P. *Eletromagnetismo*. São Paulo: Mac Graw Hill, 1978. 200p.

ROBERTS, F. F. A note on the ferromagnetic Faraday at centimetre wavelenght *J. Physics Soc.*, v. 12 , p.305-307, 1951.

ROBERTS, F.F. Anote ferromagnetic faraday effect at microwave at centimetre wavelengths - *J. Phys. Rad*, v.12 , p.305-307, 1912.

RODRIGUEZ, F. *Pinciples of polymer systems*, 3 ed., New York: Hemisphere Publishing Comporation, 1989.

ROGERS, B. A , The nature of metals, American Society for Metals, IOWA: *IOWA State University Press and Creveland*, 1951. [s.n s.l]

SAKIOTS N.G. et al Ferrites at microwaves Proceodings IRE ,v.41, p87-94, jan. , 1953.

SATTAR, A. A. Effect of magnetic order on eletrical properties of Mn- Zn ferrite single crystals, *Journal of Materials Science Letters* , v.15, p. 1090-1093, 1996.

SENSIFER, S. Ressonance loss proprieties in 9 Kmc region *Proc. IRE*, v.44, p.123-134, 1956.



SHOOHOO, R. F. *Theory and applications of ferrites*, New Jersey:Englewood Cliffs, 1960, 340p.

SILVA, O. M.M. *Processamento e caracterização do nitrito de silício aditivado com carbonato de ítrio e concentrado de terras raras*, Guaratinguetá 2000 pp 136, Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica, UNESP/FEG, Guaratinguetá

SILVA F. S. et al *Caracterização experimental de tintas, absorvedoras de radiação eletromagnética*, In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE TINTAS 6º, 1999, Rio de Janeiro. *Anais..* Rio de Janeiro, 1999 v.2 p 453-460.

SKOLNIK, M.I. *Radar handbook* New York:.. Mac Graw Hill, , 1970. 400 p.

SMIT, J.; JIN, H.P.J.W. *Ferrites*, New York: John Wiley & Sons, 1990. p.139.
Society of the Plastics Industry . *Plastics Engineering Handbook.*; Michael Berins, IPT International, Thomsons Publishing, 1991

STUIJITS L A. et al, *Philips Tech.* V.16, p.141, 1954.

TAKADA, T. *Ferrites:ICF 3*, v.19, p.3 *Proc. IEEE*, v.104B, p.362-363, 1957.

TANNENWOLD, P.E. *Ferromagnetic resonance in Mg ferrites single crystals*, *J.Phys.*, v.100, dec., p.713-719, 1995.

TOLBOLSKY, A . V., *Properties and structures of polymers*, New York Ed. John Wiley & Sons, 1964.144p.



TOLBOLSKY, A.V. *Properties of structures of polymers* 3^a ed., New York: John Wiley & Sons, 1960. 132 p.

UTTERD, V.L.G., Low magnetic saturation ferrites for microwave applications.,*Proc. IEE* v.44, n.10, oct., p.1924-1303,1956.

VAN VIETERT, L.G. Nickel –copper ferrites for microwave applications *J.A.P.*v.27, p.723-727, 1956.

VAN VLACK, L. H. *Princípios de ciência e tecnologia dos materiais*. Rio de Janeiro: Edgar Blucher,1973. 160 p.

VAN VLACK, L. H. *Propriedades do materiais cerâmicos*. São Paulo: Edgar Blucher, 1973. 140p.

WALLACE, J. L. Broadband magnetic microwave absorbers: fundamentals limitations, *IEEE Transactions on Magnetism*, v. 29, n. 6, p.4209-4214, nov.,1993 .



EFEITO PELICULAR "SKIN"

- EQUACIONAMENTO

Meio condutor

ρ = resistividade

σ = condutividade = $1/\rho$

$$J = \sigma E \quad (1)$$

meio condutor - Lei de OHM

$$V_{XE} = -\rho \mu_0 H \quad (2)$$

APÊNDICE 1

$$V_{XH} = \sigma E + i\omega \mu_0 E = \sigma E \quad (3)$$

EFEITO PELICULAR "SKIN"

$$V_{XH} = J + i\omega \mu_0 E = \sigma E \quad (4)$$

$$[\sigma E + i\omega \mu_0 E] = \sigma E$$

$$V_{XH} = \sigma E \quad (5)$$

σ = condutividade

$$V_{XVE} = V^2 E = -i\omega \mu_0 E \quad (6)$$

$$V.D = \nabla^2 \quad (7)$$

$V.D = \nabla^2 E = 0$ (7) tipo de difusão

$$V_{XVE} = V^2 E = -i\omega \mu_0 (V_{XH}) = -i\omega \mu_0 E \quad (8)$$

EFEITO PELICULAR "SKIN"

- EQUACIONAMENTO

Meio condutor

ρ =resistividade

σ =condutividade= $1/\rho$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (1)$$

meio condutor – Lei de OHM

$$\nabla \times \mathbf{E} = -i\omega \epsilon \mathbf{H} \quad (2)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \sigma \mathbf{E} + i\omega \epsilon \mathbf{E} \approx \sigma \mathbf{E} \quad (3)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + i\omega \epsilon \mathbf{E} \approx \sigma \mathbf{E} \quad (3)$$

$$|\sigma \mathbf{E}| \gg |i\omega \epsilon \mathbf{E}|$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \sigma \mathbf{E} \quad (4)$$

σ =condutividade

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = -\nabla^2 \mathbf{E} = -i\omega \mu \sigma \mathbf{E} \quad (5)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (6)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \epsilon \nabla \cdot \mathbf{E} \approx 0 \quad (7) \text{ tipo de difusão}$$

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = -\nabla^2 \mathbf{E} = -i\omega \mu \sigma (\nabla \times \mathbf{H}) = i\omega \mu \sigma \mathbf{E} \quad (8)$$

$$\nabla^2 \mathbf{E} = i\omega\mu\sigma \mathbf{E} \quad (9)$$

Da equação (9) em coordenadas retangulares, sendo uma onda uniforme segundo x e y, para o modo TEM $E_z = H_z = 0$,

$$\partial^2 E_x / \partial x^2 - i\omega\mu\sigma E_x = 0$$

sendo

que

$$\sqrt{i\omega\mu\sigma} = 1 + i\sqrt{2/\omega\mu\sigma}$$

Solução da forma $e^{\pm \sqrt{i\omega\mu\sigma} z} = e^{-z/\delta}$

portanto

$$1/\delta = \sqrt{i\omega\mu\sigma/2}$$

da equação (1), e $\mu = \mu_0 \mu_i$ tem-se:

$$\delta = \sqrt{2\rho / \omega \mu_0 \mu_i \sigma} \quad (10)$$

